

**И. Ф. ПУНАНОВ
И. С. ЖИДКОВ
С. О. ЧОЛАХ**

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ НАНОСЕКУНДНЫЙ ПРОБОЙ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

Учебное пособие



Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

И. Ф. Пунанов, И. С. Жидков, С. О. Чолах

Высоковольтный наносекундный пробой конденсированных сред

Учебное пособие

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета
для студентов вуза, обучающихся
по направлению подготовки
11.03.04 — Электроника и наноэлектроника

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2018

УДК 537.529(075.8)

ББК 34.241-047я73

П88

Рецензенты:

член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией пучков частиц ИЭФ УрО РАН Н. В. Гаврилов;
кафедра математики ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» (завкафедрой проф., д-р физ.-мат. наук В. Б. Сурнев)

Научный редактор — доц., канд. физ.-мат. наук Р. В. Емлин

Пунанов, И. Ф.

П88 Высоковольтный наносекундный пробой конденсированных сред : учебное пособие / И. Ф. Пунанов, И. С. Жидков, С. О. Чолах. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. — 116 с.

ISBN 978-5-7996-2500-9

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 11.03.04 — Электроника и нанoeлектроника, аспирантов и научных работников.

Кратко описаны существующие модели пробоя в кристаллах и жидкостях. Изложены результаты экспериментальных исследований пробоя конденсированных диэлектриков по таким характеристикам, как скорость развития канала пробоя, ток формирования канала, давление в канале пробоя, параметры плазмы в канале пробоя, кристаллографическая направленность каналов. Рассмотрены некоторые экспериментальные методы.

Учебное пособие может быть использовано для студентов и аспирантов физических специальностей, в том числе по курсам «Электрорадиоматериалы», «Электрофизические методы обработки материалов».

Библиогр.: 37 назв. Рис. 25. Табл. 8.

УДК 537.529(075.8)

ББК 34.241-047я73

ISBN 978-5-7996-2500-9

© Уральский федеральный
университет, 2018

Оглавление

Предисловие.....	5
Введение.....	6
 Глава 1. Высоковольтный наносекундный пробой конденсированных сред: теоретическая и экспериментальная база	
1.1. Теоретические подходы к описанию пробоя	11
1.1.1. Пробой жидких диэлектриков	11
1.1.2. Пробой твердых диэлектриков.....	15
1.2. Экспериментальные исследования	25
1.2.1. Скорость распространения канала пробоя.....	28
1.2.2. Ток формирования канала пробоя.....	29
1.2.3. Давление в канале пробоя	32
1.2.4. Параметры плазмы в канале пробоя	34
1.2.5. Кристаллографическая направленность каналов пробоя	36
1.3. Потребности современной техники	37
 Глава 2. Экспериментальная установка и методики исследования электрофизических характеристик пробоя	
2.1. Экспериментальная установка	47
2.2. Экспериментальные методики	54
2.2.1. Измерение скорости распространения канала пробоя	55
2.2.2. Измерение тока формирования канала пробоя.....	59
2.2.3. Измерение тока ионной компоненты плазменного пучка.....	60
2.3. Выбор объектов исследования и подготовка образцов...	67
2.3.1. Жидкие диэлектрики	67
2.3.2. Твердые диэлектрики	69

Глава 3. Пространственно-временные и энергетические характеристики наносекундного пробоя жидких диэлектриков.....	72
3.1. Скорость распространения канала пробоя	72
3.2. Плазмообразование в канале пробоя	81
Глава 4. Пространственно-временные и энергетические характеристики наносекундного пробоя твердых диэлектриков.....	88
4.1. Скорость распространения канала пробоя	88
4.1.1. Скорость распространения канала пробоя в керамических материалах, пропитанных диэлектрическими жидкостями	89
4.1.2. Скорость распространения канала пробоя в монокристаллах	93
4.2. Микроструктура канала пробоя.....	96
4.3. Давление в канале пробоя	100
4.4. Параметры плазмы в канале пробоя.....	102
Заключение	108
Контрольные вопросы	110
Список сокращений.....	111
Библиографический список.....	112

Предисловие

Настоящее учебное пособие посвящено описанию физических принципов и механизмов, которые определяют поведение жидких и твердых диэлектриков при воздействии на них мощных импульсов напряжения.

Явление пробоя диэлектриков нашло широкое применение в импульсной энергетике, в частности, на его основе созданы двигатели малой тяги для космических аппаратов. Стремительное развитие техники, увеличение мощности устройств и расширение области применения электрического пробоя обусловили применение новых материалов в технике высоких напряжений. В то же время поведение многих классических диэлектриков при приложении к ним мощных импульсов длительностью в несколько наносекунд не до конца известно. В этой связи в настоящем учебном пособии изложены подходы и методы к исследованию явления электрического пробоя в конденсированных диэлектриках. Описанные методы могут быть применены при разработке новых систем, в частности, рабочих тел электрореактивных двигателей. Приведены конкретные примеры реальных исследований, выполненных в Институте электрофизики УрО РАН и Уральском федеральном университете.

Авторы учебного пособия выражают признательность за консультации Р. В. Емлину и сотрудникам группы физики диэлектриков ИЭФ УрО РАН.

Введение

Явление нарушения электрической прочности непроводящего вещества при воздействии на него мощными электрическими полями называется *пробоем*. Пробой известен достаточно давно и сегодня привлекает внимание как физиков, так и инженеров, поскольку играет важную роль в современной технике. В то же время отсутствует полное глубокое понимание целого ряда хорошо известных аспектов пробоя, а некоторая часть проявлений пробоя и вовсе остается неизученной. В частности, на основе очень подробных исследований пробоя газовых сред и теплового пробоя твердых диэлектриков разработаны методики инженерного расчета изоляции и сконструирована защита, однако до сих пор не предложено теории электрического пробоя, которая объясняла бы всю совокупность имеющихся экспериментальных результатов и была бы непротиворечивой [1]. Этот факт и является причиной того, что при исследовании необходимых для практики закономерностей пробоя в конкретных диэлектриках используются в основном экспериментальные методы [2–4].

Одним из наиболее важных приложений экспериментальных исследований пробоя твердых и жидких диэлектриков является совершенствование существующих и разработка новых, более точных моделей этого явления. Большую потребность в таких моделях имеют исследователи, работающие в области физики плазмы и физики твердого тела. Полученные из эксперимента по пробую пространственные и временные характеристики по-

ведения вещества в зоне интенсивного воздействия, параметры образующейся плазмы, характер фазовых превращений в канале пробоя и их взаимосвязь в зависимости от внешних условий и условий воздействия могут лечь в основу теорий для описания фундаментальных механизмов пробоя [4], описания взаимодействия электронов с частицами диэлектрика [3], а также могут помочь в установлении фундаментальных закономерностей между внутренней структурой веществ и их феноменологическими характеристиками [2]. Все это открывает перспективы создания новых функциональных материалов с заданными электрофизическими свойствами.

Кроме того, такие исследования крайне важны и с практической точки зрения, так как они могут дать информацию об электрической прочности материала, что в свою очередь необходимо при проектировании конструкций, работающих в условиях экстремальных электрических напряжений [3]. Начиная с самого момента исследования электрических явлений и по сей день идет поиск материалов с лучшими свойствами, в том числе и диэлектрическими. Актуальными остается вопрос и исследования материалов, которые уже применяются в технике. Именно потребность в практическом применении и обосновывает необходимость развивать новые подходы к изучению процесса электрического пробоя и расширять область применения существующих методов. В частности, для создания более совершенных устройств, которые работают с использованием явления пробоя, необходимо уметь управлять процессами в диэлектрике при воздействии на него внешнего мощного электромагнитного излучения. Еще одним важным моментом в изучении электрического пробоя является возможность установления общих закономерностей механического и электрического разрушения, что позволяет моделировать один вид разрушения с помощью закономерностей протекания другого [5].

Сам по себе пробой — явление, не желательное в большинстве устройств, поскольку приводит к нарушению изоляции

в передающих линиях, конденсаторах, трансформаторах и может повлечь за собой потери энергии и аварии. В то же время существуют области техники, в которых пробой является физической основой функционирования устройств. Это мощная импульсная энергетика, плазмотехника, разрушение и измельчение горных пород.

В последние годы наибольшее внимание уделяется исследованию процессов, происходящих при пробое конденсированных диэлектриков при воздействии на них импульсами напряжения наносекундной длительности, что связано с потребностями современной импульсной и электроразрядной техники. В обеих указанных областях существуют тенденции увеличения плотности мощности, вкладываемой в разряд, и увеличения скорости истечения плазмы из области разряда. Все это требует применения очень высоких напряжений и способствует все большему укорочению длительности импульсов. Применение на практике таких столь высоких напряжений и укорочение импульсов до субмикросекундного и наносекундного диапазонов обусловили необходимость расширения исследований с целью получения новых данных о диэлектриках как функциональных и конструкционных материалах в этих диапазонах импульсных напряжений [2].

Собрав воедино все вышеперечисленные факты, становится понятно, что экспериментальное изучение процесса пробоя в конденсированных диэлектриках, применяемых в качестве функциональных и конструкционных в изделиях и приборах импульсной техники, в наносекундном диапазоне длительностей импульсов и при напряжениях выше 100 кВ представляется актуальным и с точки зрения практического использования диэлектриков, и с точки зрения дальнейшего развития теории электрического пробоя.

Вплоть до самой середины XX века исследование пробоя диэлектриков концентрировалось в основном на милли- и микросекундных диапазонах длительностей импульсов. При этом зна-

чительное внимание уделялось именно определению условий, при которых диэлектрики теряли свою прочность. Непосредственно формированию пробоя уделялось ничтожно мало времени, что было обусловлено главным образом экспериментальными сложностями, связанными с малой длительностью этой стадии. Шагом вперед стало появление компактных лабораторных наносекундных импульсных генераторов и измерительных приборов, которые были способны регистрировать ультракороткие импульсы, благодаря чему произошло расширение временной области, в которой изучался процесс пробоя, в том числе и стадия его формирования. Однако возросшие экспериментальные и вычислительные возможности не привели к ожидаемому прогрессу в понимании природы пробоя и созданию единой теории пробоя. В настоящее время среди экспериментальных исследований пробоя конденсированных диэлектриков при наносекундных временах воздействия электрического поля преобладают работы по пробоям жидкостей. Исследованию же твердых диэлектриков, даже монокристаллов, уделено не так много внимания. Теоретический анализ этого явления также развит слабо, несмотря на существование развитой квантовой теории твердого тела. Что касается теоретического анализа пробоя жидкости, в том числе наносекундного, то он оказывается осложнен отсутствием пробоя в жидкости дальнего порядка. Это является причиной широкого применения методов компьютерного моделирования для описания роста разрядных структур в жидких средах. Ряд исследователей высказывал предположения, что объемный пробой и пробой по поверхности диэлектрика имеют общую природу [2], однако нет надежных экспериментальных фактов, подтверждающих это. Кроме того, среди исследователей нет единого мнения относительно того, какая именно измеряемая характеристика процесса пробоя отражает исключительно свойства исследуемого диэлектрика (а не является функцией параметров разрядного контура, геометрии электродов и т. д.).

Цель данного учебного пособия — дать представления о закономерностях высоковольтного пробоя монокристаллов, диэлектрических жидкостей и композитных материалов при воздействии на них наносекундных импульсов напряжения. Экспериментальные данные, полученные по представленной в пособии методике, могут иметь важное значение для импульсной техники и высоковольтной электрофизики.

Глава 1. Высоковольтный наносекундный пробой конденсированных сред: теоретическая и экспериментальная база

1.1. Теоретические подходы к описанию пробоя

В настоящее время только для газов создана хорошо разработанная теория пробоя. Пробой же конденсированных диэлектриков (жидкостей и кристаллов) до сих пор не имеет общепризнанной физической модели. Наиболее завершенной считается лишь теория теплового пробоя. Множество же теорий электрического пробоя может удовлетворительно объяснить лишь некоторые отдельные аспекты этого явления. Как следствие среди физиков, занимающихся теорией пробоя, отсутствует единое мнение относительно того, какой механизм приводит к нарушению электрической прочности и какая физическая величина является наиболее фундаментальной характеристикой диэлектрика.

1.1.1. Пробой жидких диэлектриков

Для теоретического описания пробоя в жидкостях не существует единой стройной теории, хорошо описывающей механизм пробоя. Это является следствием достаточно логичных причин: отсутствие разработанной теории вещества в жидком

состоянии, отсутствие дальнего порядка в жидкости, наличие в жидкостях примесей, искажающих реальную физическую картину в процессе пробоя, образование пузырьков и т. д. [1]. Тем не менее, в литературе описано большое число разнообразных моделей пробоя жидких диэлектриков [1–3].

Все множество имеющихся моделей пробоя жидких диэлектриков можно условно разделить на два типа. К первому типу относятся так называемые ионизационные модели. В них явление пробоя рассматривается с точки зрения лавинообразного размножения носителей заряда в жидкости. В основе таких моделей, как правило, лежат представления теории газового разряда с переносом их в условия жидкой фазы. Таким образом исходным условием в таких моделях является возможность ускорения электронов в жидкостях с последующей ионизацией атомов и молекул. К ним относятся теории Т. Льюиса, Г. С. Кучинского, Д. Гудвина и К. Макфадена и др.

Второй тип моделей представляют неионизационные модели. В них пробой жидкости связывают с образованием разряда в газовых полостях, которые либо уже присутствуют, либо могут образоваться в результате действия электрического поля [2]. Изначально задачей таких теорий было объяснить лишь некоторые закономерности явления пробоя в жидких диэлектриках. Это является следствием сложности самого явления пробоя в жидкостях. Ко второму типу относятся теории А. Геманта, Т. Эдлера, А. Шарбо и Дж. Дивенса, Н. Н. Семенова и А. Ф. Вальтера, А. Гюн-тершульце, П. А. Флоренского и Ф. Ф. Волькенштейна, К. Као, Р. Уотсона и А. Шарбо и др.

Кроме того, есть еще ряд теорий, которые нельзя однозначно отнести к тому или иному типу, поскольку в них пробой рассматривается с точки зрения влияния твердых и жидких примесей. Таковы, например, теории Дж. Кока и М. Корби, А. Геманта и П. Бонинга.

Ушаков В. Я. указывает, что в тщательно выполненных экспериментах основные положения этих теорий не получили под-

тверждения [2]. В настоящее время теоретические исследования продолжаются в обоих направлениях, то есть рассматриваются и ионизационный, и пузырьковый механизмы. Кроме них дополнительно выделяют микровзрывной и электротепловой механизмы [6].

Рассмотрим подробнее некоторые основные существующие теории, их преимущества и недостатки. Теоретические и экспериментальные основы определения природы предпробивных пузырьков в жидкостях были предложены С. М. Коробейниковым [6]. На основе такого подхода установлено влияние электрострикционного давления в предпробивных полях на условия возникновения предпробивных пузырьков. Анализ особенностей формирования объемного заряда и пузырьков у острейшего электрода, а также расчеты изменения давления, температуры жидкости и радиуса пузырьков были проведены для нитробензола. Важно также, что в рамках этого подхода решена задача о протекании нестационарного тока при инъекции из сферического электрода. Была показана сама возможность образования в жидкостях пузырьков неионизационного происхождения при приложении импульсов высокого напряжения. С точки зрения применения на практике важным было и исследование процесса роста микропузырьков в трансформаторном масле под действием волны отрицательного давления [7]. Экспериментальное подтверждение пузырьковой модели получено при оптических исследованиях предпробойных катодных процессов в деионизированной воде.

В то же время эксперименты С. М. Коробейникова и А. В. Мелехова указывают на то, что в деионизированной воде могут возникать объемные неэлектродные анодо- и катодоориентированные стримеры. Для этого требуется напряжение до 200 кВ. В качестве объяснения такого эффекта было предложено влияние иницилирующих центров, в роли которых могут выступать микрочастицы, присутствующие в объеме жидкости. При этом напряжение электрического поля может

составлять 10^9 В/м, что является достаточным для автоионизации в жидкости.

Ряд исследователей считает, что применение моделей, которые разработаны для твердых тел, может способствовать понижению пробоя жидкостей. Так, использование модели Г. Флериха для кристаллических диэлектриков позволило С. Атвуд и У. Биксби считать, что развитие пробоя может быть обусловлено механизмом ударной ионизации. Условием для существования такого процесса выступает наличие в жидкости свободных электронов или электронов, которые могут туннелировать в зону проводимости. При этом они получают от поля энергию, которая превышает их потери на возбуждение внутримолекулярных колебаний [8]. Ушаков В. Я. предположил [6], что раз существуют определенные аналогии в закономерностях развития разряда в твердых телах и жидкостях, то к описанию пробоя в жидких диэлектриках может быть применен подход Ю. Н. Вершинина к описанию пробоя в твердых телах.

Выше уже отмечалось, что в настоящее время не создано общепризнанной теории, непротиворечиво описывающей пробой в жидкостях с единых позиций [6]. Известный специалист в области пробоя диэлектриков В. Я. Ушаков полагает, что имея последовательное описание всех фаз разряда во временной и пространственной шкалах, можно создать такую теорию [2]. Заметим, что как раз такого последовательного изложения и не хватает во всех описанных теориях. Однако, по прошествии лет, тот же В. Я. Ушаков высказывал уже другую, отличную точку зрения. Он отмечал, что такую теорию вряд ли получится создать, поскольку в каждом конкретном случае влияние могут оказывать принципиальные различия в механизмах зажигания разряда, реализующегося в разных условиях [6]. В более современной работе В. Ф. Климкин высказывает мнение, что дискуссия между сторонниками пузырькового и ионизационного механизмов пробоя при наносекундных длительностях воздействия напряжения, по сути, исчерпана [9]. Он основывает

свое мнение на том факте, что экспериментально была показана возможность сосуществования этих механизмов, а превалирование одного из них зависит от конкретных экспериментальных условий (напряженности поля, межэлектродного расстояния, внешнего давления и т. д.).

Все трудности создания общей теории пробоя жидких диэлектриков хоть и носят принципиальный характер, тем не менее не отменяют потребности в конкретных физических моделях для решения практических проблем изоляции и управляемого инициирования разряда. Таким образом, для практики важным и актуальным оказывается изучение вопроса механизма возникновения носителей зарядов, их параметров, роли газобразования в инициировании и развитии разряда, динамики и развития основных параметров канала разряда и его зоны ионизации, а также их изменения в зависимости от длительности импульсов, геометрии электродов и свойств жидкости [2]. Такими параметрами являются, например, скорость развития и ток формирования канала.

1.1.2. Пробой твердых диэлектриков

Разработки теорий, объясняющих механизм пробоя твердых диэлектриков, начались еще в 1920-е годы. Не потребовалось много времени, чтобы создать большое множество теорий, которые основывались всего на двух принципиально иных механизмах пробоя: теории, связанной с ударной ионизацией, и теории, основанной на пробое неударным механизмом. Теорий обоих типов разработано огромное множество. К теориям, связанным с ударной ионизацией, относятся теории: А. Ф. Иоффе (ударная ионизация ионами), А. Хиппеля/Г. Коллена и Г. Фрелиха (рассмотрение взаимодействия электрона с решеткой), Р. Зигера и Э. Теллера (квантовомеханическое обобщение теории А. Хиппеля), А. И. Ахиезера и И. М. Лифши-

ца (объединение теорий А. Хиппеля и Г. Фрелиха), В. Франца, М. Геллера, Н. Л. Писаренко, В. А. Чуенкова (решение кинетического уравнения для электронов проводимости в кристалле). А теории В. Роговского и Г. Горовица (электростатический разрыв кристалла), А. А. Смурова (отрыв электронов электрическим полем), К. Зинера и К. Фаулера (туннелирование электронов), Я. И. Френкеля (термическая ионизация, облегченная внешним полем) можно отнести к теориям второго типа. Как показало время, большинство из этих теорий оказались несостоятельными, некоторые (например, теории А. Хиппеля и Г. Фрелиха) давали наиболее точное предсказание экспериментальных данных только для определенного узкого класса модельных объектов.

Как неоднократно отмечалось, развитие теории пробоя обусловлено потребностями техники. Например, в середине XX века появилась необходимость предсказания электрической прочности изоляционных конструкций, а также еще целый ряд практических задач, что и привело к созданию сразу нескольких, феноменологических теорий электрического пробоя твердых диэлектриков. Например, Ю. Н. Вершинин создал свою теорию на основе работ А. А. Воробьева и Е. К. Завадовской по корреляции между электрической прочностью и различными характеристиками кристаллов. В своей теории он предположил, что для описания и анализа процесса пробоя можно привлечь представления феноменологической теории электропроводности. Кроме того, он использовал и методы феноменологической термодинамики [10].

На первый же план в этой теории выдвигалось предположение, что распространение канала пробоя может быть связано с переходом вещества из твердого состояния в состояние плотной газовой плазмы [10]. Взяв за основу положение, что вещество в канале пробоя в конечном своем состоянии может содержать не только диссоциированные, но и ионизированные частицы, которые обладают подвижностью и избыточным сум-

марным положительным зарядом, Ю. Н. Вершинин смог определить величину работы, совершаемой этими носителями тока на каналообразование. Тогда критерий пробоя можно сформулировать следующим образом:

$$\xi_c = A_c, \quad (1.1)$$

где ξ_c — удельная энергия, приобретаемая носителями тока в электрическом поле, а A_c — удельная работа, совершаемая носителями тока в процессе образования первичного канала пробоя (работа каналообразования) [10]. Численно работа каналообразования равна изменению внутренней энергии единицы объема диэлектрика при его переходе из стандартного состояния в состояние частично ионизованной плазмы. По сути она является суммой двух компонент: энергии каналообразования (W_c) и энергии сил отталкивания (B_c). В свою очередь энергия каналообразования равна

$$W_c = U + A = D + S + I, \quad (1.2)$$

где U — энергия решетки; A — электронное сродство; D, S, I — теплоты диссоциации, сублимации и ионизации, соответственно. Величина W_c служит связующим звеном между электрической прочностью и структурно-энергетическими параметрами твердого тела. Используя такой критерий пробоя, Ю. Н. Вершинин получил уравнения электрической прочности, с помощью которых можно оценить степень участия в процессе пробоя различных типов носителей тока.

Кроме того, на основе методики энергетического анализа были рассчитаны величины электрической прочности органических и неорганических диэлектриков различных классов [10]. Оказалось, что теоретически предсказанные данные показали удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными. Зная, что многие теории не дают такого точного совпадения, можно сказать, что это одно из наиболее важных следствий теории пробоя.

Еще в работах 1960-х годов Ю. Н. Вершинин высказывал предположение, что, вероятнее всего, пробой обусловлен ударной ионизацией. Он продолжил изучать пробой уже на микроуровне и пришел к неожиданному выводу. Оказалось, что литературные данные, описывающие возможность процесса ударной ионизации в твердых диэлектриках, противоречат целому ряду предположений теории твердого тела, а также и некоторым экспериментальным данным, например, исследованиям межзонного перехода электронов при реальных напряженностях поля. Как утверждает теория ударной ионизации, для ее протекания кинетическая энергия электронов должна расти до 7–14 эВ. В то же время в экспериментах было убедительно показано, что проводящие и валентные зоны имеют сравнительно небольшие ширины (2–5 эВ) в абсолютном большинстве диэлектрических кристаллов [1]. Таким образом, возможность ударной ионизации электронами при пробое твердых диэлектриков подтверждалась только согласием между измеренными и рассчитанными по теории значениями электрической прочности щелочно-галлоидных кристаллов (ЩГК).

В попытках связать ряд экспериментальных результатов (невозможность ударной ионизации и наличие пробоя в полях, предсказываемых теориями ударной ионизации) с теорией Ю. Н. Вершинин предложил доменный механизм нарушения электрической прочности [11]. Такой механизм, основанный на представлениях об электронно-дырочной проводимости диэлектриков в сильных полях, заключается в следующем: считается, что пространственные и временные характеристики пробоя определяются одним основным процессом, которым является возникновение, движение и разрушение локальных областей сильного поля. Кроме того, Ю. Н. Вершинин совместно с Ю. А. Зотовым провели анализ, который продемонстрировал, что, кроме всего прочего, нужно учитывать и разогрев носителей в сильном электрическом поле. Связано это с тем, что такой разогрев будет неминуемо приводить к неоднородному

распределению поля, а следовательно, и тока в образце, то есть к так называемой доменной электрической неустойчивости. Воспользовавшись теорией доменной электрической неустойчивости применительно к исследованиям нарушения электрической прочности, Ю. Н. Вершинин показал, что пробой в образцах, где средняя напряженность поля составляет примерно 10^8 В/м, можно объяснить без привлечения механизма ударной ионизации. Но и такая теория оказалась несовершенной. Одним из ее важнейших недостатков оказалось предположение о том, что температура собственных фононных мод кристалла не изменяется вследствие разогрева электронов и последующего рассеяния их энергии на колебаниях решетки [1]. Кроме того, существует множество экспериментальных и теоретических работ, в которых продемонстрировано одно из важных условий для реализации ударной ионизации в ШГК — перекрытие разрешенных зон. Вершинин Ю. Н. в своей теории такое перекрытие считал невозможным [1].

Следующий этап развития теорий пробоя в твердых телах связан с обнаружением в конце 1980-х годов верхней границы скорости распространения канала с катода, которая являлась и нижней границей скорости для распространения канала с анода [12]. Оказалось, что такие значения скорости развития канала соответствуют скорости звука в твердом теле. Существенная зависимость характеристик канала пробоя от полярности инициирующего электрода позволила Ю. Н. Вершинину говорить о двух различных группах процессов применительно к распространению канала пробоя: электронно-тепловые процессы для разряда с катода и электронно-детонационные для разряда с анода [4]. Он сумел показать, что при развитии канала с анода механизм пробоя схож с детонационными процессами, происходящими при взрывах или при лазерном пробое газовых сред и сильно отличается от механизма развития канала пробоя с катода [13]. На этом основании он использовал экспериментальные и теоретические методы описания детонацион-

ных процессов для количественного описания пробоя с анода. Такой подход позволил исследователям получить ряд интересных результатов, например, была обнаружена взаимосвязь параметров приложенного напряжения, пространственных и временных величин пробоя, термодинамических свойств вещества в канале, а также некоторых свойств конкретных диэлектриков.

Генерация первичных электронов, имеющая место при каскадных оже-переходах в валентной зоне диэлектрика, стала основой для модели начальных стадий электрического пробоя кристаллов, предложенной В.Д. Куликовым [14]. Такое предположение было обосновано наличием корреляции электронного строения ШГК кристаллов (структурой зон) и ориентации каналов пробоя в них. Модель позволяет объяснить многие аспекты электрического пробоя: рост значений электрической прочности с увеличением ширины запрещенной зоны диэлектрика, кристаллографическую направленность каналов пробоя, высокую скорость распространения канала пробоя с анода (10^7 – 10^8 см/с) и его электродную направленность. Также в рамках модели объясняется высокая плотность предпробойного тока (более 10^4 А/см²) без привлечения эффекта ударной ионизации.

Для реализации данной модели необходимы большие электрические поля (10^8 В/см). При высокой напряженности электрического поля возможна генерация электронов в зону проводимости из валентной зоны по туннельному механизму или по оже-механизму. Для ШГК наблюдается близкая к линейной зависимость значений электрической прочности E_b от ширины запрещенной зоны, что говорит в пользу оже-механизма. Также в пользу оже-механизма говорит экспериментально обнаруженный эффект генерации F -центров окраски в области анода в кристалле KBr в предпробойных электрических полях, связанный с генерацией электронно-дырочных пар [14]. Требуемые для реализации модели поля вполне достижимы в реальной структуре «металл—диэлектрик—металл», если учесть, что на поверхности электрода всегда присутствуют микроострия, напря-

женность поля вблизи которых может превышать $\sim 10^8$ В/см при средней напряженности в диэлектрике $\sim 10^6$ В/см. Также этот уровень напряженности достижим на вершине канала пробоя в процессе его роста, когда головная часть канала выполняет функцию острейшего электрода. Однако повышенная напряженность поля на неоднородностях электрода может быть фактором инициирования пробоя в случае, если исключено шунтирующее действие поверхностных токов, что достигается при большой скорости нарастания поля (10^{12} В/с).

Модель описывает формирование канала пробоя следующим образом. В момент подачи высокого напряжения на анод электрическое поле вблизи неоднородности электрода создает сильный наклон зон в приповерхностной области кристалла, где идет образование слоя двукратно положительно заряженных ионов галоида в результате туннельного перехода электронов на положительный электрод. Локальное электрическое поле этого слоя создает изгиб зон, превышающий ширину запрещенной зоны кристалла, на расстоянии, близком к межатомному, что позволяет реализоваться оже-переходу. Единичный цикл движения канала пробоя можно разделить на два последовательных этапа. На первом этапе при достижении критической напряженности локального электрического поля 10^8 В/см происходит образование дырок. В результате распада дырок генерируются оже-электроны в зону проводимости и канал продвигается на одно межатомное расстояние. На втором этапе электроны вытягиваются внешним электрическим полем из области объемного положительного заряда, достигается критическая напряженность поля для осуществления следующего цикла. Подтверждением вытягивания электронов служит экспериментально наблюдаемая высокая плотность тока в канале неполного пробоя ШГК. Таким образом, движение канала пробоя представляет собой процесс последовательного переноса положительного заряда по ближайшим ионам галоида в валентной зоне и генерации оже-электронов в зону проводимости. Релаксация дырки может идти только

в направлении отрицательного электрода, что экспериментально подтверждается анодным характером пробоя, развивающегося со сверхзвуковой скоростью [4].

Кристаллографическая ориентация каналов пробоя в ЩГК в рамках данной модели объясняется строением зонной структуры этих кристаллов. Распад дырок происходит в направлении, в котором зазор между энергетическим уровнем дырки и одним из уровней соседнего иона наименьший. Скорость распространения канала пробоя согласно данной модели составляет 10^7 – 10^8 см/с. Высокая скорость обуславливается малым временем оже-перехода, большим напряжением пробоя и значительной подвижностью электронов.

Кроме пробоя в ЩГК в рамках механизма каскадных оже-переходов получено объяснение ориентации каналов пробоя в кристаллическом кварце [15]. Несмотря на то, что данная теория удовлетворительно объясняет многие аспекты наносекундного пробоя в модельных кристаллах, ее применение для более сложных систем представляет значительные трудности.

В противоположность вышеописанной модели Г.А. Воробьев и др. считают, что подходы к построению теории пробоя ЩГК и других кристаллических диэлектриков на основании анализа движения электронов в идеальной кристаллической структуре не являются корректными [16]. Аргументами в пользу такой точки зрения служат экспериментальные данные о генерации в сверхсильных электрических полях точечных и линейных дефектов в микронных слоях кристаллов ЩГК, которые искажают структуру кристаллического поля [17].

В качестве механизма электрического пробоя рассматривается ударная ионизация электронами и подчеркивается, что ускорение электронов в областях с нарушенной кристаллической решеткой происходит иначе, чем в идеальном кристалле [18]. Авторы ставят под сомнение выводы работ 1960–1970-х гг. (в которых показано, что пробой может проходить без ударной ионизации) и указывают на то, что в экспериментах размноже-

ние электронов не могло быть получено по причине большой толщины образцов, а расчеты содержали допущения, требующие проверки, и были сделаны для случая слабых полей. Особо подчеркивается качественное отличие картины предпробойных процессов, имеющих место в очень тонких (10^{-5} м) слоях монокристаллов, от того, что происходит в относительно толстых образцах. Одно из характерных отличий — эффект электрического упрочнения, то есть значительного возрастания пробивной напряженности поля при уменьшении толщины разрядного промежутка, наблюдающийся в образцах толщиной менее 100 мкм [1, 3]. При таких толщинах оказывается возможным создавать в образцах очень сильные электрические поля (более $2 \cdot 10^8$ В/см), значительно превышающие по напряженности пробивные поля для «толстых» образцов, и исследовать в них в стационарном состоянии те явления, которые быстро приводят к пробоем при больших толщинах. Были исследованы токи, протекающие в микронных слоях монокристаллов ШГК, и обнаружена эмиссия из диэлектрика в вакуум электронов с энергиями порядка 6 эВ. На основании этого был сделан вывод о том, что в ШГК электроны могут ускоряться до энергий, достаточных для ударной ионизации. К этому же выводу приводят результаты экспериментов по исследованию электролюминесценции в тонких слоях ШГК. Эмиссия электронов, способных осуществлять ударную ионизацию, происходит в областях с деформированной кристаллической решеткой. Показано, что основные предпробойные процессы в тонких слоях ШГК стимулируются движением заряженных дефектов и дефектообразованием. Динамика приводящего к пробоем процесса такова: в сильном электрическом поле в локальных областях диэлектрика происходит генерация дефектов; в этих областях, где облегчен перенос заряда, текут электронные токи, сопровождаемые ударной ионизацией; локальное протекание тока приводит к усиленной генерации дефектов и стимулирует дальнейшее развитие пробоя [19].

В литературе описано еще несколько возможных механизмов пробоя твердых диэлектриков. Месяц Г. А. предложил эктонный механизм пробоя [20]. Основной идеей этого подхода является экспериментально установленный факт — в тройной точке «металл—диэлектрик—среда» (вакуум, газ или жидкость) в присутствии сильного электрического поля инициируется *эктон* — порция электронов, испускаемых катодом в результате микроскопического взрыва на его поверхности из-за большой концентрации энергии в микрообъеме катода. В результате микровзрыва образуется плазменная струя, которая движется от поверхности катода со скоростью порядка 10^6 см/с, внедряется в твердый диэлектрик и дает начало образованию канала в нем. Эктонный механизм рассматривается преимущественно по отношению к катодному пробую (катодные эктоны). Эктоны возникают также и на аноде (анодные эктоны), но их роль считается второстепенной.

Чернозатонский Л. А. рассмотрел акустоэлектронный механизм неполного электрического пробоя кристаллов и предложил для объяснения его закономерностей использовать явление фокусировки фононов [21]. Оно состоит в том, что в упруго анизотропных средах в общем случае вследствие неколлинеарности векторов фазовой и групповой скоростей существуют направления, в которых плотность фононов, излучаемых «точечным» источником (острый электрод), значительно превышает их плотность в соседних направлениях. Развивая эту идею, В. В. Зубрицкий рассчитал направления максимального концентрирования акустических фононов в ЦГК при комнатной температуре с целью проверки механизма формирования путей неполного электрического пробоя кристаллов вдоль фононных струй [22]. Автор делает вывод о совпадении путей неполного электрического пробоя с направлениями максимального концентрирования акустических фононов, возбуждаемых «точечным» источником.

Известно, что процессы, идущие на первых двух стадиях поверхностного пробоя — нарушение электрической прочности и генерация плазмы, имеют место также и при объемном пробое. Андерсон Р. проводил исследования поверхностного перекрытия диэлектриков при пробое с катода и с анода [23]. Им была высказана гипотеза о том, что механизм анодного разряда по поверхности принципиально отличается от катодного и имеет сходство с механизмом объемного пробоя. Андерсон Р. считает, что условием инициирования анодного поверхностного пробоя является генерация малого объема плазмы в области, прилегающей к поверхности, что характерно для объемного пробоя как в кристаллах, так и в жидкостях.

Таким образом, к настоящему времени сложилось два основных направления в описании пробоя в твердых диэлектриках:

- 1) механизм ударной ионизации электронами;
- 2) неударный механизм, при котором ударная ионизация по тем или иным причинам не рассматривается.

Обе точки зрения опираются на надежные экспериментальные данные, поэтому, по-видимому, нельзя говорить о полной несостоятельности какой-то одной из них. Вероятно, в процессе пробоя может реализовываться как первый, так и второй механизм в зависимости от конкретных условий эксперимента [10].

1.2. Экспериментальные исследования

В физике диэлектриков всегда важным был вопрос о том, какая измеримая физическая характеристика диэлектрика является наиболее фундаментальной. Довольно долго было принято считать, что такой характеристикой является электрическая прочность при электронном (а не тепловом) пробое в однородном поле [24]. В ходе тщательных экспериментальных исследований электрической прочности было выяснено,

что она зависит от многих факторов — состояния электродов, температуры, толщины образца, длительности воздействия. Так возникло представление о том, что существует «истинная», «физическая» (intrinsic или собственная) электрическая прочность [25]. Она не зависит ни от каких факторов, кроме физического состояния диэлектрика, и предлагается рассматривать ее в качестве физической константы диэлектрика [25]. Однако и относительно собственной электрической прочности не было определенности, так как в соответствии с некоторыми теориями пробоя твердых диэлектриков она должна была зависеть от температуры. По замечанию С. Уайтхеда [25], тот факт, что значения собственной электрической прочности укладываются в относительно узкий диапазон напряженностей электрического поля (10^6 – 10^7 В/см), вызывает сомнение в их значимости для фундаментальных исследований. Позже было показано, что в очень тонких слоях диэлектрика имеет место электрическое упрочнение и в конечном счете ситуация, когда ток в диэлектрике может протекать вообще без пробоя [26]. Эти экспериментальные факты говорили о том, что электрическая прочность фундаментальной характеристикой диэлектрика не является [13]. Воробьев А. А. и Воробьев Г. А. высказали идею, что физической константой диэлектрика может считаться электрическая прочность при бесконечной толщине диэлектрика [13]. Вершинин Ю. Н. полагал, что признаками физической константы диэлектрика обладает удельная энергия каналаобразования — минимальная энергия, которую нужно сообщить диэлектрику, чтобы перевести его из кристаллического состояния в плазменное [10].

Несмотря на то, что к середине XX века стало понятно, что пробивная напряженность не является физической характеристикой диэлектрика, экспериментальные исследования того времени все еще были сосредоточены в основном на измерении электрической прочности, главным образом, вследствие ее значимости для практики. Измерению этой величины твердых

и жидких диэлектриков (как правило, в однородном поле) посвящено значительное число монографий 1950–1960-х годов.

В ранних работах принималось, что пробой наступает при достижении напряжением максимального значения [8]. Такой критерий вводился по причине слабого развития и примитивности использовавшихся методов и время пробоя было неизвестным. Однако впоследствии было выяснено, что пробой наступает не сразу, а с некоторой задержкой, получившей название времени запаздывания пробоя. Назрела необходимость более глубокого изучения процесса пробоя, его динамики, особенно при ультракоротких временах.

Долгое время изучение динамики пробоя, несмотря на существовавший фундаментальный интерес, было ограничено отсутствием экспериментальной техники для регистрации быстротекущих процессов. Возможности для изучения наносекундного пробоя значительно возросли с широким внедрением в исследовательскую практику высоковольтных катодных осциллографов. С помощью осциллографирования стало возможным определить не только пробивную напряженность поля, но и время формирования пробоя, скорость его развития. Кроме несовершенства регистрирующей аппаратуры сдерживающим фактором в исследованиях было отсутствие импульсных наносекундных генераторов с прямоугольной формой волны на напряжение в несколько сотен киловольт [8]. Появление такой высоковольтной наносекундной техники и применение ее в сочетании со скоростной электронной, электронно-оптической и оптической аппаратурой способствовало значительному прогрессу в изучении динамики пробоя в 60–70-х гг. XX в.

Переход в наносекундную область еще сильнее понизил значимость электрической прочности для фундаментальных исследований. Было показано, что при таких коротких экспозициях напряжения диэлектрики, различные по физико-химическим свойствам, оказываются прочными примерно одинаково [6]. Это свидетельствовало о том, что в этом диапазоне для сравне-

ния диэлектриков нужно привлекать не электрическую прочность, а другие измеряемые параметры.

Таким образом, для получения полной картины процесса пробоя, особенно в наносекундном диапазоне длительностей импульсов, необходимо рассматривать его в динамике и измерять множество пространственно-временных и энергетических характеристик.

1.2.1. Скорость распространения канала пробоя

Одним из наиболее достоверных параметров разрядного процесса является скорость развития канала пробоя [6]. Исходным материалом для определения скорости служат данные о времени запаздывания разряда. Время запаздывания (задержки) разряда в общем случае складывается из времени статистического запаздывания и времени формирования разряда. При электрическом пробое твердых диэлектриков статистическим запаздыванием пренебрегают и полагают время запаздывания равным времени формирования разряда. Скорость разряда на различных участках может отличаться, поэтому обычно измеряется средняя скорость

$$V = d/\tau_{\Phi}. \quad (1.3)$$

Средняя скорость распространения разряда является функцией подвижности носителей заряда [10], что позволяет качественно проанализировать основные закономерности пробоя и оценить степень участия различных носителей в процессе пробоя. Что касается жидких диэлектриков, то по измерению времени запаздывания можно определить механизм пробоя [6]. Время задержки пробоя есть характеристика скорости, с которой в диэлектрик вводится энергия. При определенной величине ввода энергии происходит его разрушение. Знание скорости разрушения тела представляет интерес для практики.

Некоторые относительно новые (1990–2000 гг.) работы по определению скорости распространения каналов пробоя в монокристаллах выполнены с помощью генератора «РАДАН-220», генерирующего импульсы длительностью 2 нс с фронтом 0,2 нс и амплитудой 115 кВ на согласованной нагрузке. Так были получены значения порядка 10^8 см/с для скорости распространения каналов импульсного пробоя в LiD и LiH при $U = 230$ кВ. Кроме того, измерены и скорости распространения каналов пробоя в кристаллическом и аморфном кварце, равные, соответственно, $2,7 \cdot 10^8$ и $1,1 \cdot 10^8$ см/с при $U = 230$ кВ. Показано, что при $\tau < 2$ нс скорость формирования канала прямо пропорциональна приложенному напряжению.

1.2.2. Ток формирования канала пробоя

Большое значение для выяснения природы электрического пробоя и изучения процесса разрушения диэлектрика в сильном электрическом поле имеет определение тока, текущего через канал пробоя в процессе его формирования. Например, данные о плотности тока в канале пробоя позволяют оценить усредненную по сечению электропроводность плазмы канала [2]. Величину тока, протекающего по развивающемуся разрядному каналу, наравне со скоростью его развития относят к наиболее достоверным параметрам первой стадии разрядного процесса [6].

Первые попытки измерения тока в диэлектрике, находящемся в сильном поле, были предприняты достаточно давно [13]. В частности, проводились работы по измерению токов в предпробивных полях. Однако обнаружить связи между процессом пробоя диэлектрика и током, протекающим в образце перед пробоем, в то время не удалось. Было установлено, что пробой диэлектрика сопровождается резким скачком тока [13], но не удавалось уловить момент, когда слабый

(10^{-6} А) ток в предпробивном поле возрастет до больших значений на этапе разряда генератора через канал пробоя. Также было понятно, что процесс формирования канала пробоя происходит с определенной скоростью и заканчивается за определенное время, в течение которого должен протекать ток формирования пробоя [13].

Торбин Н. М. одним из первых измерил ток формирования канала пробоя в твердом диэлектрике [13]. С помощью высоковольтного осциллографа им было измерено падение напряжения при прохождении емкостного тока через включенный последовательно с образцом NaCl резистор. В конфигурации «острие — плоскость» при положительной полярности острия и действующем напряжении около 150 кВ с фронтами 0,4–7 мкс были зарегистрированы токи порядка $2 \cdot 10^{-3}$ А. В эксперименте по пробоем КВг импульсами напряжения 30–40 кВ с фронтами 0,2–3 мкс в той же конфигурации получены близкие значения токов. Торбин Н. М. усматривает аналогию между пробоем твердых диэлектриков и пробоем газов в больших промежутках: на начальной стадии происходит формирование канала, а на завершающей стадии его расширение.

Воробьев А. А. [27] измерил токи формирования каналов пробоя в монокристаллах NaCl, KCl и КВг с помощью мостовой схемы при напряжении 120 кВ в конфигурациях «острие — плоскость» и «острие — острие» и при учете диаметра каналов порядка нескольких микрон получены значения плотности тока 10^4 – 10^5 А/см². Это указывает на то, что пробивное напряжение в неоднородном поле и ток формирования канала пробоя больше у кристалла, обладающего большей энергией решетки. В качестве же механизма распространения канала рассматривалась ударная ионизация электронами.

В 1980-х годах коллективом авторов из Японии был опубликован цикл работ по измерению предпробойных токов в жидких и аморфных диэлектриках электрооптическим способом [28]. В этих работах для измерения предпробойного тока использова-

ли светодиод, включенный в цепь иглового электрода в конфигурации электродов «острие — плоскость». Интенсивность излучаемого светодиодом света пропорциональна проходящему току. Свет от светодиода передавался по оптическому волокну на фотомножитель и регистрировался осциллографом. Значения измеренных токов составляли $2,2 \cdot 10^{-2}$ А для положительного и $1,5 \cdot 10^{-2}$ А для отрицательного острия в трансформаторном масле при напряжении 40 кВ. Наблюдалась линейная зависимость предпробойного тока от скорости распространения канала пробоя. На основе наблюдаемых зависимостей было высказано предположение, что связь предпробойного тока со скоростью стримера означает, что распространение пробоя коррелирует с инжектированным зарядом в большей степени, чем с действующим напряжением.

Кроме того, тем же способом исследованы и предпробойные токи в трансформаторном масле, толуоле, бензоле, циклогексане и четыреххлористом углероде при воздействии прямоугольных импульсов напряжения амплитудой 15–30 кВ, длительностью 550 нс и 2,5 мкс и фронтом 15 нс, а также в трансформаторном масле при действии импульсов амплитудой 50–60 кВ, длительностью 760 нс и фронтом 20 нс. Показано, что предпробойный ток растет с возрастанием межэлектродного промежутка.

В более поздних работах измерены и токи пробоя полиэтилена при тех же параметрах импульса напряжения, а полученные значения составили $1,5 \cdot 10^{-2}$ А. На основе анализа осциллограмм предпробойных токов и сравнения зависимостей времени задержки пробоя от длины межэлектродного промежутка для полиэтилена при положительной и отрицательной полярности острия с результатами, полученными для жидкостей, формируется вывод, что механизм пробоя в наносекундном диапазоне длительностей импульсов в жидких и твердых диэлектриках одинаков.

Все перечисленные работы были выполнены на относительно длинных импульсах и фронтах. Позднее была предложена методика определения среднего тока формирования канала

пробоя, в основе которой лежит экспериментально зарегистрированное уменьшение скорости распространения канала пробоя при включении резистора в цепь игольчатого анода. В монокристаллах хлорида калия при напряжении 230 кВ и длительности фронта порядка 0,2 нс получены значения тока формирования канала пробоя 40 ± 20 А, что дает величину плотности тока $\sim 10^7$ А/см² при диаметре канала порядка 10 мкм.

Кроме того, существует методика определения тока образования проводящего канала на основе результатов измерений частоты и длительности затухающих колебаний напряжения на измерительном сопротивлении. Для корректного определения тока через образец учитывается сопротивление канала пробоя. Методика применена для измерения тока пробоя в ПЭТФ-пленках. Получено, что при напряженности поля $U \sim 10^7$ В/см средний ток пробоя составляет $I \approx 23$ А. Плотность тока в канале равна $2,3 \cdot 10^7$ А/см².

1.2.3. Давление в канале пробоя

Еще одним важным параметром, характеризующим пробой в конденсированном диэлектрике, является давление в канале пробоя. Известные методики определения давления основаны на измерении скорости ударной волны в диэлектрике при его пробое и его ударной адиабате, по скорости роста радиуса канала пробоя, регистрации фазовых превращений вещества вокруг искры и анализе химических превращений на фронте ударной волны. С помощью этих методик были получены оценки давлений в канале пробоя в различных веществах. В канале пробоя в ПММА при воздействии импульсами напряжения амплитудой 650 кВ и периоде разрядного тока 1,1 мкс при скорости ударной волны $3,6 \cdot 10^5$ см/с получена величина давления 3 ГПа. При пробое мрамора импульсами амплитудой 320 кВ получены давления не ниже 11 ГПа.

В 1970-х годах коллективом советских авторов (М. П. Тонконогов и др.) был проведен цикл теоретических и экспериментальных работ по изучению динамики канала импульсного электрического пробоя [29]. Предпринята попытка определить параметры канала разряда и ударной волны, возникающей при пробое, при заданном законе ввода энергии в канал. Канал аппроксимировался круговым плазменным цилиндром, при этом плазма характеризовалась только ионной температурой. Такой подход позволил получить временные зависимости ряда величин (скорость роста радиуса канала, давления в канале), выраженные через электрические параметры разрядной цепи. Применение модели к пробую в кристаллах NaCl позволило оценить давление на стенки канала. Расчетные значения составили 3,5 ГПа через 1 мкс после начала ввода энергии. Эксперимент же демонстрирует значение порядка 2,5 ГПа. Кроме того, удалось вычислить скорость выброса и температуру (при этом использовался известный закон ввода мощности в разрядный промежуток). Для этого была использована предложенная газодинамическая модель выброса плазмы из канала пробоя через отверстие в диэлектрике.

Во всех рассмотренных работах внимание уделялось преимущественно микросекундным процессам. Исследование динамики пробоя в наносекундном временном диапазоне стало особенно актуальным и получило развитие после создания оптических квантовых генераторов в 60-х годах XX в. Например, был изучен оптический пробой кристалла KCl при воздействии на него лазерным импульсом с энергией 0,3 Дж и длительностью 40 нс. Плотность мощности лазерного излучения достигала 10^{12} Вт/см². Была получена скорость распространения трещины порядка $(2-6) \cdot 10^6$ см/с, что в 5–15 раз больше скорости продольного звука в этом кристалле в направлении $\langle 100 \rangle$. Было достаточно убедительно показано, что скорость распространения трещины в кристалле не ограничена скоростью звука. Оказалось, что если прилагать усилие, под действием кото-

рого образуется трещина, не в устье трещины, а в ее вершине, в непосредственной близости от области разрушения, то скорость образования такой трещины не будет зависеть от скорости звука в среде. В случае трещинообразования при наносекундном пробое такую нагрузку осуществляет горячая плазма, скорость движения которой может достигать 10^6 см/с.

Позднее было рассчитано давление в головной части канала пробоя в КС1 в наносекундном диапазоне (при минимальной скорости распространения канала пробоя с анода $6 \cdot 10^5$ см/с) в приближении электронной детонации ($1,8 \cdot 10^{11}$ Па) и в приближении плотной неидеальной плазмы ($1,1 \cdot 10^{11}$ Па). Похожие результаты были получены и на основании данных о геометрических параметрах трещин при анодном пробое в КС1 импульсами напряжения 220 кВ. Решение статической краевой задачи анизотропной теории упругости дало оценку давления, которое оказывает плазма на стенки канала пробоя в процессе его формирования, равного $(6-24) \cdot 10^{10}$ Па.

1.2.4. Параметры плазмы в канале пробоя

Для оценки ряда параметров образующейся плазмы можно использовать некоторые результаты измерения пространственно-временных (время задержки пробоя, скорость распространения канала) и электрических (ток и плотность тока в канале) характеристик. Так, зная скорость распространения волны ионизации, можно определить плотность плазмы в канале пробоя. Знание плотности тока в канале пробоя позволяет оценить среднюю электропроводность плазмы канала. Существуют и прямые методы определения параметров плазмы. К ним можно отнести измерение скорости ионов с помощью цилиндра Фарадея (магнитные и электростатические анализаторы), масс-спектрометрию, электрооптическую хронографию выброса сгустка частиц при выходе канала из образца, измере-

ние импульса отдачи пучка частиц с помощью крутильного маятника и др.

Вершининым Ю. И. диагностировалась канальная плазма монокристаллов NaCl длиной 3–5 см [10]. На образцы подавалось напряжение амплитудой 400 кВ от генератора, формирующего импульсы длительностью 2 нс в согласованном режиме со скоростью нарастания $dU/dt = 3 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{15}$ В/с. Выброс плазмы регистрировался методом щелевой развертки на расстоянии 10^{-2} см от поверхности образца. Показано, что существуют две компоненты плазмы: «быстрая», имеющая скорость $(3-8) \cdot 10^6$ см/с, и «медленная» со скоростями $(1-3) \cdot 10^5$ см/с. Температура плазмы лежит в диапазоне от 10^4 до 10^6 К, давление — 10^{10} Па. Кроме того, пробивались образцы KCl и NaCl длиной 10 см в тех же импульсных условиях. Скорость выброса составила $2 \cdot 10^6 - 10^7$ см/с. Температура плазмы лежит в диапазоне $(2,5-9) \cdot 10^5$ К. Методическим недостатком было то, что выброс плазмы осуществлялся при атмосферном давлении, что не позволяло корректно определить параметры образующейся плазмы.

Недавно были исследованы параметры плазмы при наносекундном пробое в KCl и капиллярном разряде в хлориде калия и полиэтилене высокого давления на импульсах длительностью 5 нс с фронтом 0,2 нс и напряжении 230 кВ. При пробое из канала пробоя происходит выброс плазмы со скоростью 25 км/с. При этом отсутствовали многозарядные ионы, а поток плазмы при первоначальном пробое существенно менее интенсивен, чем при капиллярном. Энергомассовый анализ вылетающей плазмы пробоя как хлорида калия, так и полиэтилена показал, что наблюдаемые высокозарядные ионы из капиллярного пробоя образованы во время сильноточной фазы пробоя. Затем была исследована зависимость скорости наносекундного пробоя в KCl от параметров импульса напряжения. При напряжении 320 кВ от генератора типа Аркадьева-Маркса, длительности импульса порядка 10 нс и скорости нараста-

ния $8 \cdot 10^{13}$ В/с получены значения скорости распространения канала $V_c = 1,1 \cdot 10^8$ см/с, скорости выброса плазмы $V_p = 3 \cdot 10^6$ см/с и температуры плазмы $T = 3,5 \cdot 10^5$ К для образца длиной 35 мм, и $V_c = 0,4 \cdot 10^8$ см/с, $V_p = 1,5 \cdot 10^6$ см/с и $T = 2 \cdot 10^5$ К для образца длиной 80 мм.

1.2.5. Кристаллографическая направленность каналов пробоя

Отличительной характеристикой пробоя в кристаллах является кристаллографическая ориентированность разрядных каналов. Для наблюдения ориентированных каналов в кристаллах не требуется специальной аппаратуры, благодаря чему этот аспект пробоя интенсивно изучался на ранних этапах исследований по электрическому разрушению твердых тел [30]. Несмотря на большой объем экспериментальных данных [31], окончательного объяснения явление не нашло.

Возможности для выяснения общих закономерностей электрических разрядов в диэлектриках дает анализ результатов исследований неполного пробоя в компенсированных полупроводниках. Показано, что основные свойства ориентированных электрических разрядов в непрямозонных полупроводниках аналогичны свойствам разрядов в диэлектриках. Кристаллографическая ориентация разрядов в твердых телах обусловлена самоконцентрированием электрического поля на фронте разряда в определенных направлениях, возникающих вследствие пространственной анизотропии распределения свободных зарядов при условии сильной нелинейной поляризации кристалла. Экспериментально было подтверждено предположение о роли сильной нелинейной поляризации в механизме формирования стримера при пробое в полупроводниках. Важно учитывать этот эффект и в случае пробоя диэлектриков. Если в формировании пробоя роль играют электроны, движущиеся с большой скоростью, то направление их движения должно измениться

в поперечном магнитном поле пропорционально их подвижности как $\text{tg}\alpha = \mu B$. Были испытаны образцы CdS в магнитном поле 35 Тл при температурах 180–300 К при воздействии импульсов амплитудой 25 кВ длительностью 8 нс. При этом не наблюдалось отклонения треков пробоя, кроме температурного. Этот результат не подтверждает реализацию механизма ударной ионизации электронами.

Скорость распространения канала пробоя, плотность тока его формирования, проводимость, степень ионизации, температура плазмы, давление в канале, геометрические параметры каналов являются важными характеристиками наносекундного пробоя. Численные данные по этим характеристикам являются ценной с практической точки зрения информацией и могут быть использованы при конструировании новых электрофизических устройств. С фундаментальной точки зрения важно то, что, измеряя эти характеристики, можно делать выводы о роли в процессе пробоя тех или иных носителей заряда, судить о механизме пробоя.

1.3. Потребности современной техники

Исторически развитие физики пробоя, как части физики диэлектриков, было обусловлено развитием техники. Самые первые исследования пробойных процессов были вызваны нуждами энергетики, то есть в первую очередь необходимо было испытывать диэлектрики на электрическую прочность при высоких напряжениях в режимах постоянного тока или переменного тока промышленной частоты. Следовательно, и напряжения соответствовали таковым в передающих линиях, трансформаторах и т.д. Если переключить свое внимание на импульсный пробой, то и он был обусловлен потребностями энергетики, например, проводились испытания грозовым

импульсом. Характерные длительности импульсов при этом составляли 10^{-4} — 10^{-7} с.

В середине XX века появились устройства, напряжения в которых достигали сотен киловольт, а длительности импульсов стали измеряться в наносекундах. Началом применения таких устройств можно считать измерения скорости развития разряда в твердых, жидких и газообразных диэлектриках [32]. А уже в 1960-х годах, вследствие развития мощной импульсной техники (или, как еще говорят, мощной импульсной энергетики), проявился значительный интерес к исследованиям наносекундного пробоя в вакууме, газах и конденсированных средах.

Сегодня импульсная энергетика и силовоточная электроника вызывают наибольшую заинтересованность в исследовании импульсного пробоя. Обусловлено это тем, что пробой диэлектрика является физической основой функционирования большинства устройств, которые используются в данных областях. При этом наибольшее распространение на практике получили устройства, работающие на пробое в газе или в вакууме. К таким устройствам можно отнести искровые газовые разрядники, силовоточные электронные диоды. Устройства же, работающие на основе пробоя жидких и твердых диэлектриков, не получили такого широкого распространения. Например, коммутаторы с пробоем в жидкости применяются в мощных импульсных генераторах с жидкостными формирующими и передающими линиями, работающими в режиме редко повторяющихся импульсов. Так, в установке Аугоа используются управляемые масляные разрядники. В установках HERMES-III и МИГ применяются разрядники-обострители на самопробое в воде [33]. Пробой с последующим разрядом в жидкости используется в некоторых производственных процессах, связанных с органическими материалами, например, для пиролиза нефти, синтеза нанотрубок. Разрядники с объемным пробоем в твердом диэлектрике применяются в импульсных генераторах с высокой скоростью нарастания тока [33]. Разряд в жидкости использу-

ется в промышленности для электроискровой обработки металлов, создания высоких давлений (ЭГД-эффект). Основой работы установок по электроимпульсному разрушению горных пород служит явление внедрения канала пробоя в твердый диэлектрик при пробое на границе с жидкой средой (эффект Воробьевых) [34]. А мощные разрядники, коммутирующие мегаамперные токи при напряжениях до 100 кВ, работают с использованием пробоя по поверхности диэлектрика [33]. Наконец, тяга в импульсных электрореактивных двигателях (ИЭРД) создается в результате выброса плазмы при перекрытии высоковольтным разрядом поверхности диэлектрика в вакууме.

В настоящее время мощная импульсная энергетика имеет два основных направления развития. Первое связано с увеличением мощности импульсов и, соответственно, созданием установок с максимально возможными значениями тока и напряжения. Пиковые мощности таких установок достигают 10^{14} Вт, напряжения до 10^7 В, токи до 10^6 А [32]. Примерами таких установок в России могут быть тераваттный импульсный генератор ГИТ-12, способный развивать ток 6 МА при выходном напряжении 700 кВ [32]; установка «Ангара-5–1» с генератором напряжения на 1,6 МВ, развивающим ток до 6 МА; установка МИГ, генерирующая импульсы напряжения с амплитудой до 6 МВ и током до 2,5 МА. Из зарубежных установок стоит отметить:

- самый мощный в мире импульсный генератор Z (США) мощностью 100 ТВт, развивающий ток 20 МА при длительности импульса 100 нс и имеющий энергозапас 20 МДж [8],
- ускоритель HERMES-III (США) с напряжением 20 МВ, током 800 кА,
- ускоритель Aurora (США) — напряжение 15 МВ, ток 1,6 МА, длительность импульса 125 нс,
- ускоритель KALIF-HELIA (Германия) — напряжение 6 МВ, ток 400 кА [7].

В России и США проектируются установки пентаватт-ного уровня мощностью 10^{15} Вт. В нашей стране планируется создание генератора «Байкал» с длительностью импульса 100–200 нс и током 50 МА на основе индуктивного накопителя с энергозапасом 900 МДж. В США существует проект генератора для термоядерного z-пинча на 1000 ТВт с напряжением 24 МВ и длительностью импульса 100 нс. Плотность мощности, развиваемая устройствами и вкладываемая в вещество, также стабильно повышается. Новейшими лазерами достигнута интенсивность 10^{21} Вт/см², в будущем она может быть увеличена до 10^{23} – 10^{24} Вт/см².

Другим направлением развития импульсной энергетики является технологическое применение мощных наносекундных импульсов — создание новых лазерных, плазменных, пучковых технологий, технологий связи, где имеют значение не максимизация параметров, а компактность, надежность, высокая средняя мощность и повторяемость импульсов [35]. В качестве примеров устройств с таким набором характеристик можно назвать ускорители электронов ПУЧОК, ВИРА, СИНУС, РАДАН, а также устройства на их основе: катодолюминесцентные анализаторы, дефектоскопы, релятивистские СВЧ-генераторы, широко разрабатываемые в Институте электрофизики УрО РАН.

Общее в двух обозначенных направлениях развития то, что они сопровождаются переходом к использованию более коротких импульсов и увеличением рабочих напряжений.

Укорочение импульсов в устройствах сильноточной электроники и импульсной энергетики является способом увеличения мощности (компрессия электромагнитной энергии) [33]. Повышение уровней напряжения продиктовано, главным образом, необходимостью увеличивать силу тока в условиях, когда уменьшение сопротивления не дает эффективного результата. Последнее вызвано тем, что при коротких импульсах активное сопротивление составляет малую часть полного, поэтому радикальное уменьшение сопротивления даже при использо-

вании сверхпроводников не приводит к значительному росту силы тока [35]. В частности, увеличение выходного напряжения малогабаритных генераторов требуется для повышения эксплуатационных характеристик этих устройств при внедрении их в научно-исследовательскую практику, при этом наиболее востребованным в компактных устройствах импульсной силовоточной электроники является диапазон 100–300 кВ [35]. Например, повышение напряжения до 100–150 кВ в источниках электронов необходимо для увеличения прозрачности фольговых окон для вывода пучков электронов в атмосферу. В рентгенодефектоскопии повышение напряжения вплоть до 400 кВ необходимо для того, чтобы иметь возможность просвечивать детали большей толщины. Для малогабаритных генераторов плазмы фактором повышения выходного напряжения с 5–10 кВ до 100–200 кВ служит экспериментально обнаруженное увеличение скорости истечения плазмы при этих напряжениях. Переход к амплитудам напряжения в сотни киловольт с субнаносекундными фронтами представляет интерес для исследования сверхбыстрой динамики электронов и нелинейных явлений в квантовой плазме металлов и эффективности преобразования введенной энергии в энергию излучения [35]. Источники больших импульсных токов (10^5 – 10^6 А) и напряжений (10^6 – 10^7 В) с короткими фронтами необходимы в экспериментах по сверхбыстрому нагреву плазмы в ускорительной технике и лазерах [6].

Известно, что одновременное укорочение длительности импульса и повышение действующего напряжения сильно сказывается на процессах пробоя, качественно меняя картину явления [2]. В частности, при переходе от микросекундных импульсов к нано- и субнаносекундным при пробое диэлектриков происходит резкая интенсификация всех параметров процесса и возрастание параметров плазмы в канале пробоя — плотности, скорости истечения, длительности свечения [36]. При этом возможна смена механизма пробоя. К настоящему вре-

мени накоплено большое количество экспериментального материала по пробую различных технических диэлектрических материалов в милли- и микросекундном диапазоне длительностей импульсов. Это такие вещества, как фторопласт, оргстекло, эпоксидные смолы, разнообразные пластмассы и керамики, минеральные масла, вода, спирты, фторорганические и кремнийорганические жидкости, различные классы углеводородов и т. д. Переход в наносекундную область длительностей импульсов обуславливает необходимость расширения и углубления знаний о свойствах пробоя этих материалов. Более того, множество объектов для изучения импульсного электрического пробоя непрерывно расширяется: в настоящее время ведется поиск и разработка новых конструкционных и функциональных материалов, которые находят применение в импульсной энергетике и электронике большой мощности. К таким материалам относятся нанокерамики, новые типы диэлектрических жидкостей, композиционные материалы и т. д. Представляется интересным и актуальным исследовать воздействие коротких импульсов высокого напряжения также и на эти новые материалы.

Одним из таких материалов является наноструктурная керамика на основе иттрий-алюминиевого граната, легированного неодимом (Nd^{3+} : YAG). Благодаря новым технологиям стало возможно получение относительно дешевых керамических материалов, которые могут заменить монокристаллы. Впервые такой материал был синтезирован в 1984 году в Нидерландах, но только в 1995 году исследователями из Японии был продемонстрирован материал, по оптическим свойствам близкий к монокристаллу. Современные Nd^{3+} : YAG лазеры работают в режиме с модулированной добротностью, в котором в активную среду (кристалл) вводится энергия с большой плотностью. Если плотность энергии превышает некоторое пороговое значение, происходит оптический пробой кристалла. Известно, что плотности мощности, выше которых происходит оптический пробой кристалла, сравнимы по порядку величины со значе-

ниями плотности мощности, вводимой в канал электрического пробоя (10^9 – 10^{13} Вт/см²). Кроме того, в оптическом и электрическом пробое задействованы сходные механизмы. Это позволяет сделать вывод, что изучение энергетических характеристик электрического наносекундного пробоя материалов, используемых в лазерах в качестве активной среды, имеет практическое значение для квантовой электроники, поскольку позволяет получить информацию о свойствах материала при введении в него энергии с высокой плотностью за короткое время.

Наноструктурная оксидно-алюминиевая керамика — другой новый материал, из которого делаются износостойкие детали машин, струеформирующие сопла, изоляторы и т. д. Однако это далеко не все возможные области применения данного материала. Керамические материалы обладают высокой стойкостью к электрическим разрядам, поэтому представляется возможным использовать их в качестве подложек в разрядных камерах электрореактивных двигателей (ЭРД) на жидком рабочем теле. Принцип работы таких двигателей состоит в том, что тяга создается за счет выброса плазмы, образующейся в результате разряда по поверхности диэлектрика (подложки), смоченного жидкостью. Если подложка обладает пористой структурой, это позволяет подавать жидкость непосредственно в область разряда и осуществлять регулировку подачи изменением давления. Использование жидкого рабочего тела в сочетании с технологией его подачи через пористую подложку поднимает вопрос о том, как электрический разряд будет воздействовать на узел подачи рабочего тела, что требует специальных исследований.

Направленность этих исследований определяется следующими факторами. Для космической техники крайне важным является требование минимальности начальной массы космического аппарата, в соответствии с чем более выгодно иметь на борту рабочее тело меньшей массы, но отбрасываемое с большей скоростью [35]. Повышенные значения скорости истечения плазмы (порядка 100 км/с против 5 км/с) имеют место при переходе

к разрядам на высоких напряжениях (100–1000 кВ) в наносекундном диапазоне. Также известно, при разряде в жидкости, находящейся на поверхности твердого тела, имеет место эффект Воробьевых, то есть внедрение разряда в подложку и ее разрушение при большой крутизне фронта импульса (менее 10^{-5} с) [37]. Таким образом, высокое напряжение и крутые фронты импульсов делают подложку, по которой идет разряд, исключительно электронапряженным узлом. Ясно, что для того, чтобы использовать тот или иной материал для изготовления конкретного узла устройства, необходимо знать свойства материала в тех диапазонах напряжений и длительностей импульсов, в которых предполагается эксплуатировать этот узел. Поэтому исследование разрушения керамических материалов, пропитанных диэлектрическими жидкостями, с помощью высоковольтных импульсов с крутым фронтом (10^{-10} – 10^{-9} с) является важным этапом при создании новых образцов импульсных ЭРД.

Еще одним объектом для исследования пробоя, связанным с импульсной энергетикой, являются диэлектрические жидкости. Жидкости широко используются в качестве изолирующих сред в оборудовании электроэнергетики и высоковольтной технике. В импульсной технике наиболее распространенными жидкими диэлектрическими средами являются деионизированная вода, глицерин, трансформаторное масло. Эти жидкости соответствуют основным требованиям, предъявляемым к жидкой изоляции, а именно: высокая электрическая прочность, малая активная проводимость, химическая стойкость по отношению к воздействию электрического разряда, быстрое восстановление диэлектрических свойств после пробоя [6]. Несмотря на то, что эти жидкости зарекомендовали себя как надежные изоляторы, поиск жидкостей с лучшими диэлектрическими свойствами не перестает быть актуальным. Использование более устойчивых к электрическим нагрузкам жидкостей позволит уменьшить габариты генераторов в устройствах импульсной энергетики и получить более короткие импульсы, в космической

технике — свести к минимуму начальную массу аппарата и т. д. Кроме этого, жидкости используются в качестве наполнителей в сверхвысоковольтных разрядниках (вода, трансформаторное масло). В данном случае жидкость должна обеспечивать минимальное время коммутации, малые потери и высокую стабильность в широком интервале напряжений [2]. Задачи по созданию более эффективной изоляции и жидкостных разрядников с высокой временной стабильностью обуславливают необходимость испытания новых синтетических диэлектрических жидкостей на импульсную электрическую прочность и исследования их электрофизических характеристик.

Развитие импульсной энергетики, плазмотехники, квантовой электроники и других областей техники, где применяются высокие импульсные напряжения, идет по пути увеличения вкладываемой в вещество мощности, что требует все более высоких напряжений и переход к более коротким импульсам. Для компактных лабораторных мощных сильноточных устройств диапазон напряжений составляет от десятков киловольт до нескольких мегавольт. Диапазон применяемых импульсов — от десятков наносекунд до долей наносекунды. Использование диэлектрических материалов в качестве конструкционных или функциональных в таких импульсных условиях невозможно без знания их поведения при воздействии ультракоротких мощных импульсов напряжения. Для многих материалов, традиционно используемых в импульсной технике, подобного рода сведения относятся к области микросекундных воздействий. Эти сведения не всегда могут быть применены в наносекундной области, поскольку при укорочении воздействия импульса все основные характеристики пробоя радикально меняются, что делает актуальными соответствующие наносекундные исследования. Совершенно необходимым является получение сведений о свойствах новых диэлектрических материалов при воздействии на них высоковольтных наносекундных импульсов.

Коротко можно сформулировать следующие проблемы в исследовании электрического пробоя:

- 1) ни одна из существующих теорий не описывает в полной мере процесс электрического пробоя на всех его стадиях,
- 2) не выяснено, какая величина является фундаментальной физической характеристикой диэлектрика при данном его состоянии,
- 3) важными характеристиками процесса пробоя являются: скорость распространения фронта пробоя в диэлектрике, плотность тока формирования канала пробоя, давление в канале пробоя, степень ионизации и температура образующейся плазмы, кристаллографическая направленность каналов пробоя (для кристаллов),
- 4) сведения о пробое диэлектриков, полученные на относительно длинных (микросекундных) импульсах, не всегда могут быть применены для более коротких импульсов (нано- и субнаносекундных),
- 5) исследование пробоя диэлектриков в диапазоне напряжений 0,1–1 МВ важно с практической точки зрения, поскольку рабочие напряжения в приборах и установках импульсной энергетики превышают сотни киловольт.

Таким образом, существует необходимость проведения экспериментальных исследований пробоя диэлектрических материалов, применяемых в качестве функциональных и конструкционных в изделиях и приборах импульсной техники, при воздействии на них наносекундных импульсов напряжения амплитудой выше 100 кВ с субнаносекундными фронтами.

Глава 2. Экспериментальная установка и методики исследования электрофизических характеристик пробоя

2.1. Экспериментальная установка

Первым и важным этапом создания установки, которая будет измерять электрофизические характеристики электрического пробоя диэлектриков в наносекундном диапазоне длительностей импульсов и мегавольтном диапазоне напряжений (уровень мощности 10^7 – 10^8 Вт), является выбор генератора импульсов напряжения.

Импульсные генераторы, созданные в ИЭФ УрО РАН в 1998–2012 гг., работают в диапазоне длительностей импульсов от 2 до 50 нс и в диапазоне амплитуд напряжений от 60 до 230 кВ. Некоторые из них имеют конструкцию, аналогичную генератору «РАДАН-220». Характеристики генераторов приведены в табл. 2.1.

Из приведенной таблицы видно, что генераторы типа ФАКС и ФАКЕЛ (их работа основана на SOS-эффекте) при достаточно большой амплитуде импульса напряжения имеют относительно длинные передние фронты импульса. Как известно, при длительности импульса менее 5 нс скорость распространения канала пробоя в диэлектрике перестает зависеть от длительности фронта действующего напряжения. Таким образом, результаты по скорости распространения фронта пробоя, ко-

торые можно получить при помощи этих генераторов, нельзя сравнивать с результатами, полученными при других значениях длительности импульса.

Таблица 2.1

**Сравнительные характеристики
некоторых наносекундных высоковольтных генераторов**

Генератор	Напряже- ние холосто- го хода, кВ	Длитель- ность им- пульса, нс	Время на- растания импульса, нс	Энергия в импуль- се, Дж
РАДАН-220	230	2	0,2	1,0
РАДАН-эксперт	150	2	0,2	0,5
Г-8	140	8	0,5	0,8
ФАКС-100	120	50	20	0,8
ФАКС-300	120	50	20	0,2
ФАКЕЛ-300	120	50	20	0,5
ФАКЕЛ-500	120	50	20	0,5

Если мы говорим, что нам необходимы результаты, которые можно применять к процессам пробоя, происходящим на импульсах практически действующих высоковольтных блоках ИЭРД (работающих на принципе перекрытия диэлектрика), то необходимо иметь в виду размер разрядного промежутка в блоках плазмогенераторов. Он составляет от 10 до 25 мм в коаксиальной конфигурации. С точки зрения уменьшения потерь энергии разряда выгодно, чтобы процесс пробоя межэлектродного промежутка происходил за время, не более чем в 1,5–2 раза превышающее время длительности импульса. Для генераторов «РАДАН-220» и «РАДАН-эксперт», способных генерировать импульсы с наиболее короткими фронтами, время пробоя такого промежутка составляет порядка 10–15 нс, что в 5–7 раз больше длительности импульса. Разряд генератора такого типа на образец диаметром 16 мм будет представлять собой цепочку из 5–7 последовательных отражений, что приводит к заметному росту потерь и падению электрического КПД генератора.

Для корректного описания динамики процесса пробоя в конденсированных диэлектриках, особенно при определении скорости развития канала пробоя, важным является время достижения амплитудного значения напряжения, которое должно быть много меньше времени исследуемого процесса. Для многих кристаллов скорость распространения канала пробоя при напряжениях в сотни киловольт составляет 10^7 – 10^8 см/с. Это означает, что канал пробоя продвинется на 1 мм за время, не превышающее 10 нс. Следовательно, для исследования динамических характеристик пробоя в диапазоне напряжений порядка сотен киловольт должны использоваться импульсы с фронтами менее 1 нс.

Лучше всего соответствует требованиям по длительности импульса и времени нарастания генератор Г-8. Амплитуда импульса у этого генератора сравнима со значениями у генераторов, работающих на SOS-эффекте. Фронт импульса достаточно короткий (меньше 0,5 нс), чтобы можно было пренебречь зависимостью результатов измерения параметров от фронта импульса. Длительность импульса достаточна, чтобы сильноточная стадия пробоя начиналась после воздействия первого приходящего импульса напряжения (как при поверхностном перекрытии, так и при объемном пробое твердых и жидких диэлектриков).

Генератор наносекундных импульсов Г-8 (см. рис. 2.1) представляет собой трансформатор Тесла, встроенный в коаксиальную формирующую линию с неуправляемым газовым разрядником, в качестве которого использован промышленный разрядник Р-43. Сходные по конструкции наносекундные высоковольтные генераторы описаны в монографии [7].

Первичная обмотка трансформатора Тесла (7) имеет 3 витка, вторичная (8) — 200 витков. В качестве источника питания генератора использован высоковольтный стабилизированный источник напряжения, с помощью которого в зависимости от подключения можно было получить напряжение от 0 до ± 4000 В. Блок зарядки генератора состоит из сбор-

ки конденсаторов суммарной емкостью 1 мкФ (2), управляемого разрядника РУ-62 (3) и схемы управления. Блок питания через ограничивающий резистор 3 МОм (1) заряжает сборку конденсаторов, постоянная времени цепи равна 3 с. Управляющим импульсом от схемы управления (либо внешним импульсом) запускается разрядник РУ-62, при этом блок конденсаторов разряжается на первичную обмотку трансформатора Тесла. В цепь последовательно с внутренним проводником формирующей линии (6) включен газовый разрядник-обостритель Р-43 (9), срабатывающий, когда напряжение на формирующей линии достигает 140 кВ.

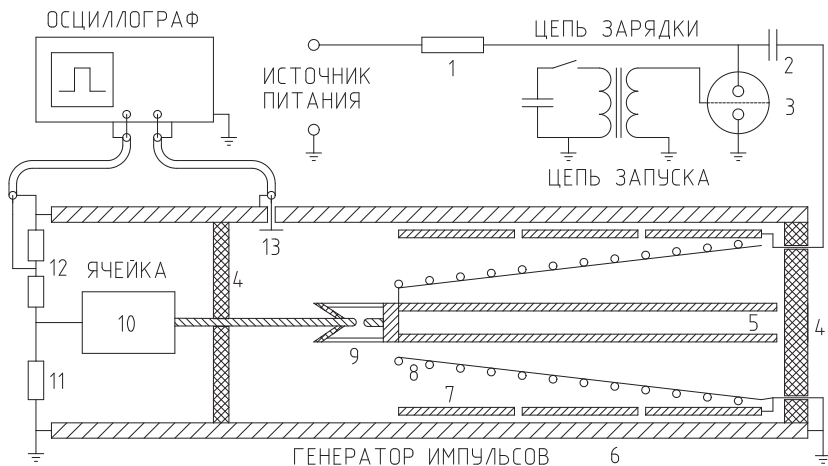


Рис. 2.1. Схема генератора Г-8 и измерительной цепи:

1 — ограничивающий (зарядный) резистор; 2 — батарея конденсаторов на 1 мкФ; 3 — управляемый газовый разрядник РУ-62; 4 — изоляторы; 5, 6 — внутренний и внешний проводники формирующей линии генератора; 7, 8 — первичная и вторичная обмотки трансформатора Тесла; 9 — неуправляемый газовый разрядник Р-43; 10 — пробойная ячейка; 11 — токовый шунт; 12 — резистивный делитель напряжения; 13 — емкостный делитель напряжения

Характеристиками генератора, имеющими значение для экспериментов по пробое диэлектриков, являются волновое со-

противление (импеданс), энергозапас, длительность импульса, характеристики фронтов.

Радиусы внутренней и внешней частей формирующей линии r_1 и r_2 равны соответственно 2 и 7 см. Диэлектрическая проницаемость среды в формирующей линии конденсатора $\varepsilon = 2,2$. Импеданс формирующей линии с такими характеристиками равен:

$$Z = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}} \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{60}{\sqrt{2,2}} \ln \left(\frac{7}{2} \right) \approx 51 \text{ Ом.} \quad (2.1)$$

Импеданс генератора определяет максимальную величину тока, которую может развить генератор. В режиме короткого замыкания ток генератора равен

$$I_{\max} = \frac{U}{Z} = \frac{1,4 \cdot 10^5}{51} \approx 2700 \text{ А.} \quad (2.2)$$

Принимая во внимание, что коаксиальная формирующая линия генератора представляет собой цилиндрический конденсатор, энергия, запасаемая в формирующей линии (энергозапас), может быть определена по формуле:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon l}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \cdot \frac{U^2}{2}. \quad (2.3)$$

Длина формирующей линии l равна 80 см. Таким образом, энергия, запасаемая в формирующей линии генератора Г-8, составляет 0,8 Дж. Длительность импульса генератора определяется удвоенной электрической длиной формирующей линии:

$$\tau_{\text{н}} = 2 \frac{l\sqrt{\varepsilon}}{c} \approx 8 \text{ нс.} \quad (2.4)$$

Одиночный импульс такой длительности формируется при работе генератора на согласованную нагрузку 50 Ом, что видно из осциллограммы на рис. 2.2, а. Длительность фронта импульса составляет менее 0,5 нс. Форма напряжения при работе гене-

ратора в режиме короткого замыкания показана на рис. 2.2, б, в режиме холостого хода на рис. 2.2, в. Скорость подъема напряжения dU/dt в режиме холостого хода равна $3 \cdot 10^{14}$ В/с.

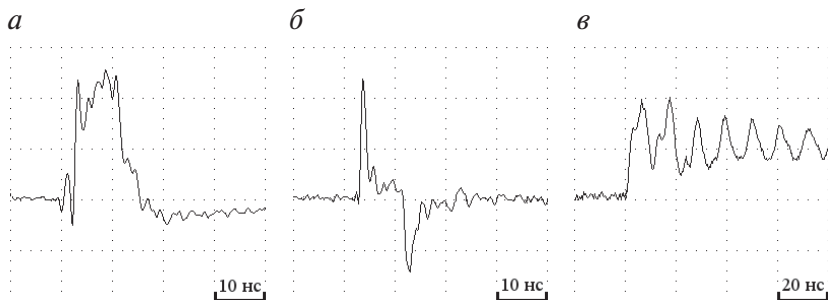


Рис. 2.2. Осциллограммы напряжения в разных режимах работы генератора:

а — разряд на согласованную нагрузку 50 Ом; *б* — короткое замыкание; *в* — холостой ход

Поскольку генератор работает в наносекундном диапазоне, то для регистрации сигналов в установке использован четырехканальный запоминающий цифровой осциллограф Tektronix TDS 644 В, рассчитанный на работу с сигналами до 500 МГц, что соответствует ширине полосы частот измеряемых импульсов. Скорость развертки на экране осциллографа 1 нс/см, что позволяет регистрировать моменты времени появления сигналов $U(t)$ и $I(t)$ с общей погрешностью не более 0,2 нс, а погрешность определения промежутков времени $\Delta t \sim 0,4$ нс. Измерительная цепь включает в себя емкостные и резистивные делители напряжения, стандартные коаксиальные кабели с импедансом 50 Ом, аттенюаторы на 6, 10 и 20 дБ.

Генератор наносекундных импульсов (1) может быть подключен к вакуумной камере (19) с вакуумным агрегатом (см. рис. 2.3). Объем вакуумной камеры составляет 5 литров.

Вакуумный агрегат состоит из пластинчато-роторного насоса 2 НВР- 5 ДМ (4) для создания предварительного вакуума и паромасляного насоса НВДМ-100 (8) с вакуумным затвором 23 ВЭ-100 (10) и азотной ловушкой (9). В системе используются электромеханический вакуумный клапан КВУМ-25 Л (6) и ручной вакуумный клапан КВР-25 (5). Контроль давления в камере осуществляется при помощи манометрических преобразователей ПМТ-2 (либо ПМТ-4 М) (12) и ПМИ-4 (13), подключенных к ионизационно-термопарному вакуумметру ВИТ-2 (14). Вакуумный агрегат обеспечивает разрежение в камере не хуже 10^{-4} Торр. Внутри вакуумной камеры находятся вакуумная пробойная ячейка (22) и цилиндр Фарадея (16). Снаружи вакуумной камеры расположено ярмо с постоянными магнитами (17) и кольца Гельмгольца (20) для создания отклоняющего магнитного поля. В зависимости от цели эксперимента возможно использовать ту или иную комбинацию элементов измерительного комплекса.

2.2. Экспериментальные методики

Совокупность элементов экспериментального оборудования позволяет использовать их для измерения времени и скорости, а также тока и плотности тока формирования каналов пробоя в жидкостях и кристаллах, скоростного и масс-зарядового спектров ионной компоненты плазменного пучка, возникающего при пробое диэлектрика. Методики измерения всех этих параметров подразумевают осциллографирование сигналов тока и напряжения (сигнал тока после замыкания разрядом межэлектродного промежутка при пробое, сигнал тока при попадании пучка частиц в коллектор ионов).

2.2.1. Измерение скорости распространения канала пробоя

Для определения скорости распространения фронта проводящего канала (как в жидкостях, так и в кристаллах) предлагается использовать ячейку, изображенную на рис. 2.4. Корпус ячейки (3) имеет прозрачные стенки для возможности фотографирования происходящих разрядных процессов. Используется конфигурация электродов «острие — плоскость» с положительным острием (7), (5).

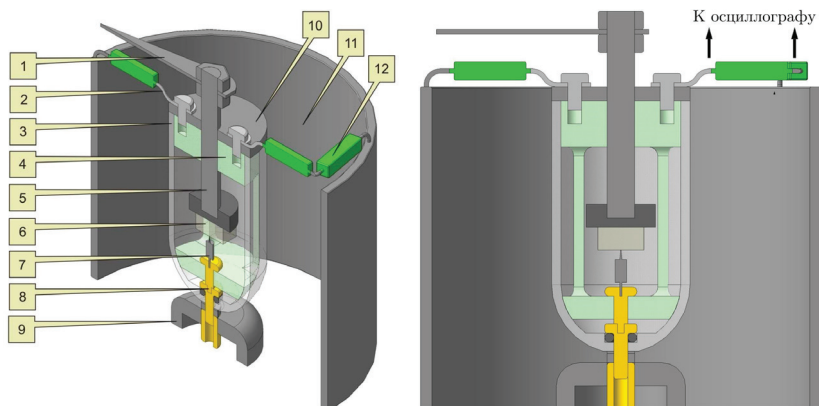


Рис. 2.4. Пробойная ячейка:

1 — стрелка-указатель; 2 — токовый шунт; 3 — корпус ячейки; 4 — держатель; 5 — плоский катод; 6 — образец; 7 — игольчатый анод (либо балластный резистор с иглой); 8 — анодный узел; 9 — узел сопряжения с высоковольтным выходом генератора; 10 — контактная площадка; 11 — корпус генератора; 12 — резистивный делитель напряжения

Конфигурация электродов выбрана на основании следующих соображений. Во-первых, для изучения стадии формирования канала пробоя требуются поля, во много раз превышающие пробойные, что обуславливает использование острий как концентраторов поля. Во-вторых, известно, что разряд с острийного анода является процессом, протекающим с су-

щественно сверхзвуковой скоростью [4]. Процессы, развивающиеся с такими скоростями (10–100 км/с) в образцах порядка нескольких миллиметров, заканчиваются за время, сопоставимое с длительностью действующих импульсов (10^{-9} – 10^{-7} с), что удобно с точки зрения изучения наносекундной динамики канала пробоя.

Пробой жидкостей в описываемой установке можно исследовать в диапазоне межэлектродных расстояний 0,25–6 мм. В этом диапазоне межэлектродных расстояний пробой большинства выбранных жидких диэлектриков завершается в течение наносекундных интервалов времени. Кроме этого, такие межэлектродные расстояния используются в управляемых жидкостных коммутаторах на десятки и сотни киловольт.

Иглы не подвергались специальной подготовке с целью создания максимально возможной напряженности, поскольку после инициирования пробоя роль иглы выполняет головная часть канала, радиус которой зависит от действующего напряжения.

Основным измеряемым параметром является время появления сильного тока искрового пробоя (до начала дуговой фазы). Осциллографируется одновременно ток и напряжение, что дает более полную картину развития пробоя. Временем пробоя $\tau_{пр}$ считается время между моментом подачи импульса на образец и началом резкого возрастания тока через образец и перехода к мощному разряду генератора (см. рис. 2.5).

Сигнал начала возрастания тока (см. рис. 2.4) через образец (6) после наступления пробоя измеряется с помощью шунта (2), включенного последовательно с образцом, и резистивного делителя напряжения из резисторов типа ТВО (12). Напряжение на формирующей линии после срабатывания разрядника-обострителя измеряется с помощью емкостного делителя напряжения с коэффициентом деления 2000. Межэлектродное расстояние регулируется с помощью винта со стрелкой (1).

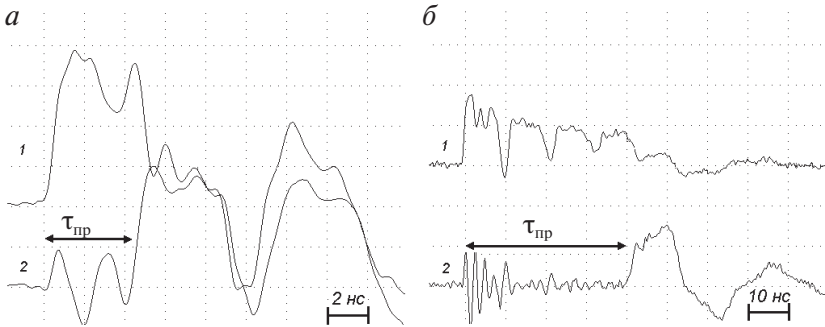


Рис. 2.5. Типичная осциллограмма при пробое образца за время, меньшее длительности импульса (без отражений) — *a*, $\tau_{\text{пр}}$ — время формирования канала пробоя; типичная осциллограмма пробоя образца за время, большее длительности импульса (с многократными отражениями) — *б*: напряжение на образце (1) и ток, проходящий через образец (2)

Канал пробоя в жидкости может распространяться по сложной траектории, что выражается в широком разбросе экспериментально определенных времен развития канала. В условиях такого эксперимента скорость роста канала можно полагать равной среднему значению

$$\langle V \rangle = \frac{d}{\langle \tau_{\text{ф}} \rangle}. \quad (2.5)$$

Путем подключения резисторов различного номинала параллельно образцу (см. рис. 2.6) в пробойной ячейке, изображенной на рис. 2.4, можно варьировать действующее на образец напряжение. Формирующая линия генератора, имеющая импеданс 51 Ом, и нагрузочный резистор образуют делитель напряжения. Величину напряжения, приложенного к образцу, можно найти по формуле:

$$U_{\text{обр}} = \frac{U_{\text{ген}}}{R_{\text{H}} + Z} \cdot R_{\text{H}}, \quad (2.6)$$

где $U_{\text{обр}}$ — напряжение на образце, $R_{\text{н}}$ — сопротивление нагрузки, $U_{\text{ген}}$ — напряжение холостого хода генератора, Z — импеданс генератора.

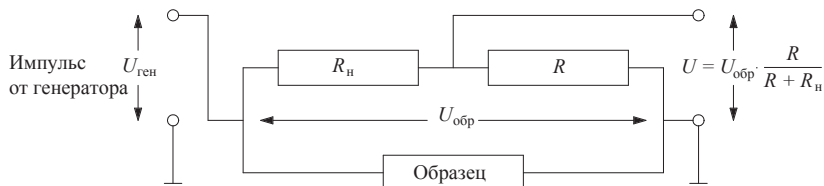


Рис. 2.6. Схема делителя напряжения

Методика определения скорости распространения канала пробоя в кристалле по осциллограммам тока и напряжения и использовавшаяся пробойная ячейка не отличаются от описанной для жидкостей. Образец (6) помещается между иглой (7) и плоскостью (5), внутрь корпуса ячейки заливается трансформаторное масло (см. рис. 2.4). Пространство вокруг ячейки (внутри корпуса генератора) также заполняется трансформаторным маслом. При высоких напряжениях в широком диапазоне толщин время формирования канала в монокристаллах ШГК пропорционально толщине образца [4], поэтому скорость определяется как

$$V = \frac{d}{\tau_{\Phi}}. \quad (2.7)$$

Для определения скорости распространения канала *неполного пробоя* в кристалле можно использовать метод фоторегистрации, так как длина свечения на фотографии практически равна длине самого канала пробоя. При включении резистора 50 Ом параллельно образцу (согласованного с импедансом генератора) на образец в течение 8 нс действует напряжение 70 кВ и можно полагать, что канал практически полностью формируется за это время. Чем ближе напряжение на образце к напряжению холостого хода генератора, тем погрешность этого из-

мерения больше. Для возможности фоторегистрации свечения при пробое в генераторе в месте установки пробойной ячейки сделаны окна. Образцы помещаются в ячейку, аналогичную изображенной на рис. 2.4, но в ней не используются токовый шунт (2) и резистивный делитель напряжения (12).

2.2.2. Измерение тока формирования канала пробоя

Для измерения тока формирования канала предлагается методика, в основе которой лежит измерение скорости распространения канала, что позволяет провести измерения на той же установке, лишь модифицировав пробойную ячейку.

В анодную цепь (см. рис. 2.4) включается маломощный балластный резистор (7), паразитной емкостью которого на нулевой электрод можно пренебречь ($RC \ll \tau_{\text{фр}}$), одновременно этот резистор служит игольчатым анодом. В качестве балластных используются малоиндуктивные непроволочные углеродные резисторы YAGEO типа CF-0.125 двух номиналов 1,2 и 2,7 кОм и мощностью 0,125 Вт. При подаче на анод импульса высокого напряжения предразрядный ток, формирующий канал пробоя, проходит через балластный резистор. На этом резисторе падает часть напряжения импульса $\Delta U = R_6 I$, так что действующее напряжение на образце оказывается меньше амплитудного на эту величину, что приводит к уменьшению скорости пробоя в кристалле по сравнению с обычным анодным пробоем. Зная эту скорость, по графику $V(U)$ (см. рис. 2.7) можно определить эффективное напряжение U_2 , приложенное к образцу. Падение напряжения на резисторе равно $\Delta U = U_1 - U_2$. Отношение ΔU к сопротивлению резистора R_6 дает среднее значение тока $I = \Delta U / R_6$, протекающего в образце до замыкания проводящим каналом разрядного промежутка и начала сильноточной фазы пробоя.

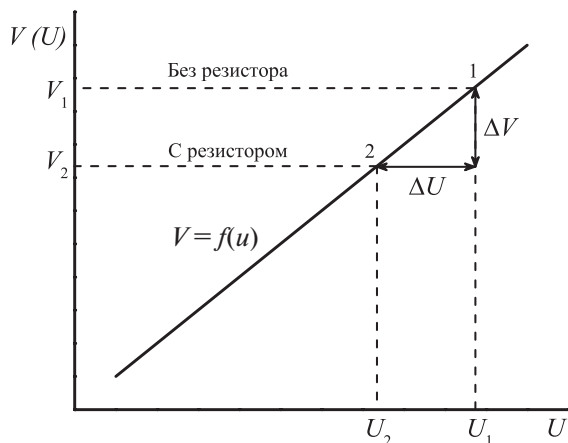


Рис. 2.7. Методика определения величины предразрядного тока

2.2.3. Измерение тока ионной компоненты плазменного пучка

В процессе пробоя вещество в канале ионизуется, превращаясь в плазму. При разгерметизации канала в газовую среду или в вакуум из него истекает пучок быстрых частиц, состоящий собственно из плазмы, нейтрального газа и микрочастиц вещества. Поток быстрых частиц также возникает при поверхностном пробое диэлектрика. Распространенным методом определения энергии высокоскоростных частиц является измерение скорости частиц и отношения заряда к массе с помощью времяпролетного анализатора. Простой времяпролетный анализатор представляет собой только коллектор ионов (цилиндр Фарадея), с помощью которого регистрируются ток и скорость ионной компоненты потока частиц. Скорость определяется как отношение расстояния между разрядом и цилиндром (времяпролетная база) ко времени прихода частиц в цилиндр. Начало разряда сопровождается электромагнитной наводкой, которая на осциллограмме отображается в виде всплеска тока.

Этот всплеск представляет собой надежную точку отсчета времени пролета частиц. Для определения отношения заряда частиц к массе времяпролетный анализатор дополняется отклоняющей магнитной системой.

Отклоняющая магнитная система, используемая в описываемой установке, состоит из колец Гельмгольца и блока питания. При токе 1 А кольцами создается магнитное поле 60 Гс. Предельный ток — 2 А. Размер области магнитного поля, создаваемого кольцами, по линии «область разряда — коллектор ионов» составляет 10 см. За пределами этой области поле спадает достаточно быстро, так что при расчетах траекторий ионов им можно пренебречь.

Высота используемой вакуумной камеры позволяет изменять времяпролетную базу в диапазоне 10–50 см. Вакуумный агрегат обеспечивает давление в камере 10^{-4} Торр, при котором длина свободного пробега молекул азота составляет около 50 см.

Для измерений параметров плазмы в каналах объемного пробоя применяется ячейка, показанная на рис. 2.8. Кристаллическая пластина (4) устанавливается на игловой анод (6) и фиксируется с помощью эпоксидной смолы. Герметизация контакта образца с анодом необходима также для исключения паразитного разряда по нижней поверхности грани кристалла. Анод с образцом помещается в ячейку (5), которая заливается вакуумным маслом для предотвращения пробоя на корпус камеры. По достижении каналом пробоя поверхности кристалла, противоположной игольчатому аноду, поток плазмы устремляется из канала в вакуум. Ток разряда замыкается на катод (3) по поверхности образца, создавая дополнительный поток ионов, который искажает сигнал тока от пучка частиц из канала объемного пробоя. Для корректного измерения параметров объемного выброса важно не допустить появления сигнала от пучка частиц поверхностного разряда, сведя к минимуму путь разряда по поверхности после выхода его из канала пробоя. Это достигается путем наложения на образец металлической фольги с отверсти-

ем диаметром 1 мм. В некоторых ЩГК каналы пробоя распространяются по направлениям, лежащим в плоскостях спайности (например, KCl и KBr), поэтому можно с большой точностью установить место, где канал выйдет на поверхность кристалла, и позиционировать фольгу с отверстием нужным образом. Вклад поверхностной компоненты в таком случае минимален.

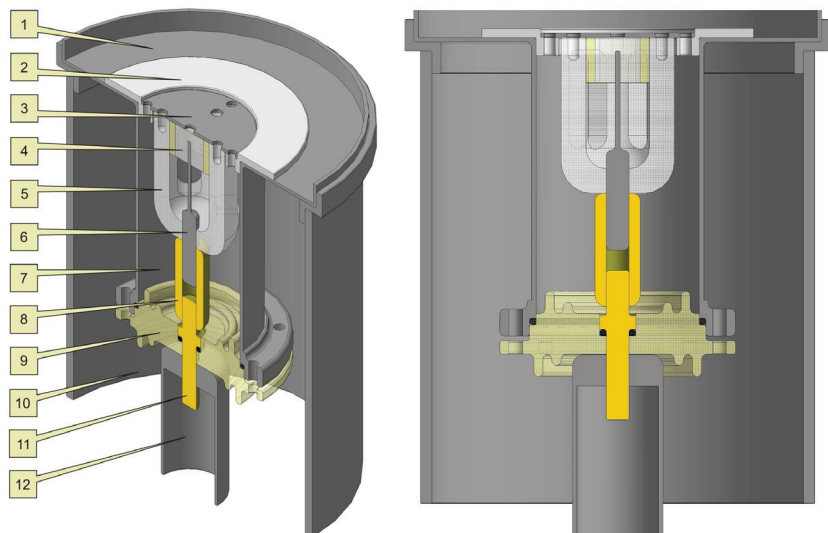


Рис. 2.8. Пробойная ячейка для исследования выброса плазмы из канала пробоя:

1 — вакуумная камера; 2 — держатель катода; 3 — катод; 4 — образец; 5 — корпус ячейки; 6 — игольчатый анод; 7 — резервуар для вакуумного масла; 8 — соединитель; 9 — изолятор; 10 — корпус генератора; 11 — токоввод; 12 — узел сопряжения с высоковольтным выходом генератора

Для измерений параметров плазмы, истекающей из области поверхностного пробоя, использовалась пробойная ячейка с электродами линейной конфигурации, изображенная на рис. 2.9. Коаксиальная разрядная конфигурация более эффективна с точки зрения преобразования вещества в плазму.

Однако для изучения разряда по поверхности ЩГК это преимущество теряет ценность по причине того, что разряд очень быстро становится контрагированным.

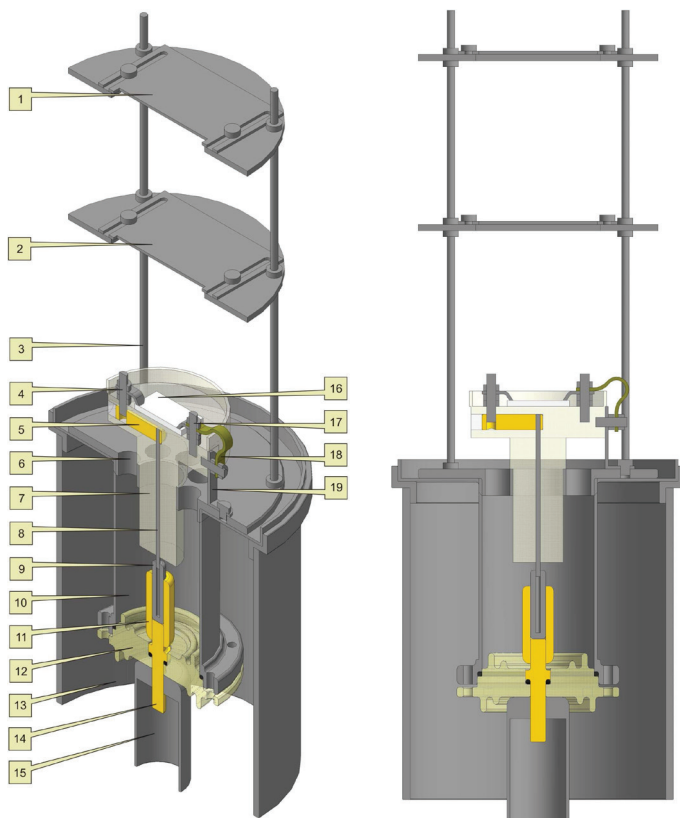


Рис. 2.9. Пробойная ячейка линейной конфигурации для исследования разряда по поверхности диэлектрика:

1 — диафрагма шириной 5 мм; 2 — диафрагма шириной 3 мм; 3 — стойка; 4 — анод; 5 — анодный узел; 6 — опора; 7 — корпус ячейки; 8 — высоковольтный стержневой контакт; 9 — вставка; 10 — резервуар для вакуумного масла; 11 — соединитель; 12 — изолятор; 13 — корпус генератора; 14 — токоввод; 15 — узел сопряжения с высоковольтным выходом генератора; 16 — образец; 17 — катод; 18 — гибкий контакт; 19 — заземляющий контакт

Ячейка (7) выполнена из оргстекла, имеет в верхней части диаметр 44 мм. Электроды (4) и (17) из нержавеющей стали имеют ширину 2 мм в месте контакта с образцом (16) и находятся на расстоянии 11 мм друг от друга. Катод (17) заземлен. Ячейка соединяется с высоковольтным токовводом (14) посредством высоковольтного стержневого контакта (8). Центрирование ячейки относительно камеры осуществляется благодаря опоре (6). В опоре имеются отверстия для выхода остаточных газов из вакуумного масла. Для фокусировки пучка используются две металлические регулируемые диафрагмы (1) и (2), располагающиеся на расстоянии 50 и 100 мм от поверхности образца (16). Нижняя диафрагма (2) имеет размеры 40×3 мм, а верхняя (1) — 40×5 мм.

Для проведения экспериментов используются два цилиндра Фарадея. Простой односекционный цилиндр (см. рис. 2.10, а) включает в себя заземленный корпус (4), изолированный от корпуса коллектор ионов (3) и сетку (1) с коэффициентом пропускания 0,5. Сигнальный контакт (6) коллектора ионов соединялся стандартным коаксиальным кабелем с одним из входов осциллографа. Апертура приемника составляет 39 мм. Ток ионной компоненты плазменного потока в телесном угле $0,01$ ср составляет порядка 50 мА. Чтобы обеспечить необходимую чувствительность и полосу пропускания ($RC \ll 10^{-7}$ с), между коллектором ионов и корпусом включен нагрузочный резистор. Сопротивление резистора (900 Ом) подобрано таким образом, чтобы напряжение сигнала, подающегося на осциллограф, составляло не больше нескольких десятков вольт (см. рис. 2.10, б).

Пучок частиц, приходящий в цилиндр Фарадея, является квазинейтральным, поэтому для того, чтобы определить ток ионной компоненты пучка, необходимо удалить из него электроны. Для этого цилиндр Фарадея помещается в магнитное поле постоянных магнитов с индукцией 3 мТл. Магниты служат также для локализации внутри цилиндра вторич-

ных электронов, возникающих при бомбардировке ионами дна и стенок коллектора. В поле магнитов ларморовский радиус электронов, движущихся со скоростью 10^5 м/с, составляет 0,2 мм. Таким образом, система магнитов позволяет эффективно удалять из пучка электроны без подачи смещающего напряжения на сетку.

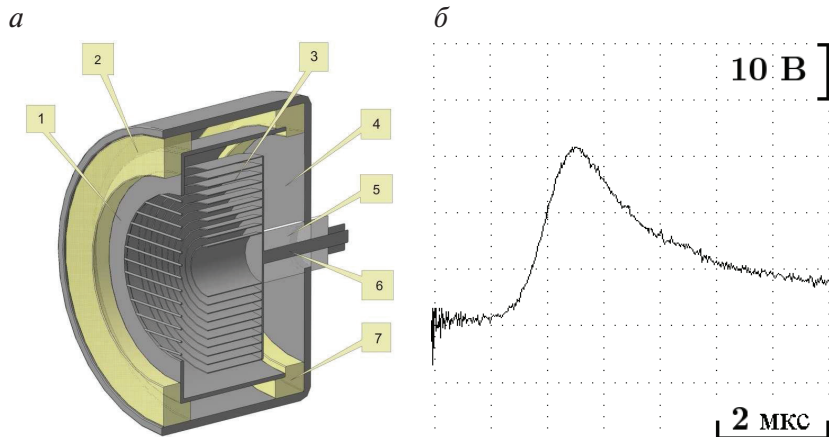


Рис. 2.10. Цилиндр Фарадея односекционный — *а*: 1 — экран с сеткой; 2, 7 — изолирующая проставка; 3 — коллектор; 4 — корпус; 5 — изолятор; 6 — сигнальный контакт; типичный сигнал напряжения с цилиндра — *б*

Двухсекционный цилиндр (см. рис. 2.11) также имеет заземленный корпус (6), закрытый крышкой (1) с сеткой с коэффициентом пропускания 0,5. Внутри корпуса расположены два коллектора ионов (3), изолированных от корпуса проставками (2). Сигнальный контакт (4) подключается коаксиальным кабелем к осциллографу. Ширина каждой секции составляет 10 мм, расстояние между секциями — 6 мм. В отсутствие магнитного поля большая часть пучка приходит в центральную секцию (при соответствующей фокусировке). При подаче тока на кольца Гельмгольца часть легких и высокозарядных ионов отклоняются и попадают в боковую секцию (см. рис. 2.11).

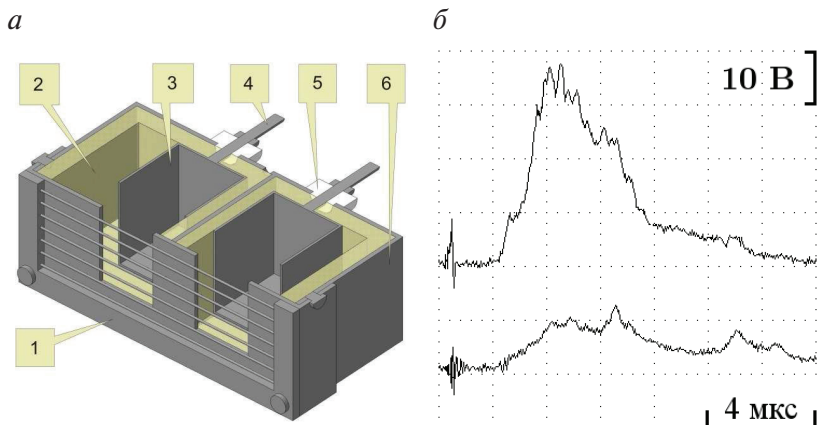


Рис. 2.11. Цилиндр Фарадея двухсекционный — *a*: 1 — крышка с сеткой; 2 — изолирующие проставки (оргстекло); 3 — коллектор; 4 — сигнальный контакт; 5 — изолятор; 6 — корпус; типичный сигнал напряжения с цилиндра — *б*

Отклонение ионов в магнитном поле определяется по формуле:

$$\Delta = \frac{qBL_bL_d}{mV}, \quad (2.8)$$

где q — заряд иона, B — индукция магнитного поля, m — масса иона, L_b — расстояние, пройденное в магнитном поле, L_d — дрейфовая длина.

Взвешенно, что скорость ионов при поверхностном перекрытии может достигать сотен километров в секунду. Например, для ионов H^+ , летящих со скоростью 200 км/с, при дрейфовой длине $L_d = 20$ см для перехода в боковую секцию ($\Delta = 16$ мм) нужно пройти 10 см в поле с индукцией 0,002 Тл. Ионы Li^+ , летящие с той же скоростью при той же дрейфовой длине, будут полностью переведены из центральной секции в боковую при поле с индукцией 0,014 Тл (Li^{3+} при индукции 0,004 Тл). Более тяжелые, но более медленно движущиеся ионы (например, K^{5+} , летящие со скоростью 100 км/с) при прочих равных условиях переводятся в боковую секцию полем с индукцией 0,008 Тл.

Таким образом, конструкции ячеек, геометрия времяпролетного анализатора и условия вакуума, параметры цилиндров Фарадея, максимальная величина магнитного поля позволяют измерять скорости ионов и производить простейший ионный анализ плазмы пучков, возникающих при поверхностном перекрытии диэлектрика высоковольтным разрядом и истекающих из канала высоковольтного пробоя кристалла.

2.3. Выбор объектов исследования и подготовка образцов

В качестве объектов исследования предлагаются различные жидкие, кристаллические и аморфные диэлектрики различных классов. Выбор объектов для исследований был обусловлен следующими факторами: доступность, возможность практического применения результатов исследования.

2.3.1. Жидкие диэлектрики

Для изучения пробоя в жидкой среде предлагаются как широко использующиеся в импульсной высоковольтной технике жидкости, так и новые, ранее не исследовавшиеся в наносекундном диапазоне жидкие диэлектрики. Материалы первого рода это трансформаторное масло, дистиллированная вода, этиловый и изопропиловый спирт, вакуумное масло, глицерин и полисилоксаны. Материалы второго рода — диэлектрические фторсодержащие органические жидкости разных химических классов (ЖДФ). Некоторые их характеристики приведены в табл. 2.2. На этапе подготовки образцов жидкости предлагается испытать на электрическую прочность в режиме медленно растущего напряжения в стандартном испытателе масла типа АИМ-90 (при $d = 2,5$ мм). Результаты такого испытания представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.2

Физические характеристики диэлектрических жидкостей

Диэлектрик	σ , $\text{Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$	ϵ_r , 1 МГц	M , г/моль	ρ , г/см ³
Пропиловый эфир перфторвалериановой кислоты	$9,4 \cdot 10^{-11}$	7,35	306	1,41
Метиловый эфир перфторэнантовой кислоты	$1,9 \cdot 10^{-11}$	6,2	378	1,66
Феноловый эфир перфторвалериановой кислоты	$< 10^{-10}$	6,14	340	1,48
Нитрил перфторпеларгоновой кислоты	$< 10^{-13}$	2,44	445	1,71
Перфторэйкозан	$< 10^{-13}$	2,08	1038	1,96
ПМС-200	$5 \cdot 10^{-15}$	2,7	> 6000	0,97
Трансформаторное масло	$10^{-16} - 10^{-14}$	2,2	—	0,895
Вакуумное масло	10^{-16}	2	—	0,87
Глицерин	10^{-9}	42,4	92	1,26
Дистиллированная вода	$10^{-6} - 10^{-4}$	78,3	18	1,00
Этиловый спирт	$7,7 \cdot 10^{-10}$	26,4	46	0,789
Изопропиловый спирт	$3,5 \cdot 10^{-6}$	20,7	60	0,7855

Таблица 2.3

Электрическая прочность жидкостей, измеренная на АИМ-90

Диэлектрик	$E_{пр}$, кВ/мм
Трансформаторное масло	22
ПМС-200	16
Нитрил перфторпеларгоновой кислоты	17
Метиловый эфир перфторэнантовой кислоты	14
Перфторэйкозан	12
Изопропиловый спирт	4

По отношению к результатам испытания жидкостей в квазистатическом режиме их можно разделить на две категории: 1 — при испытании жидкостей в ячейке возникает искра непосредственно перед срабатыванием механизма остановки привода испытателя и 2 — при испытании жидкостей резкое нарастание

тание тока и остановка привода происходят, но искры в ячейке не наблюдается. В частности, при испытании пропилового эфира перфторвалериановой кислоты, фенолового эфира перфторвалериановой кислоты, диметилового эфира перфторлитарной кислоты, диметилового эфира перфторадипиновой кислоты, диметилового эфира перфтор-3-оксоэнантовой кислоты и изо-пропанола в ячейке не возникает искры между электродами. Это, вероятно, связано с тем, что проводимость этих жидкостей более $10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$.

Фторорганические жидкости относительно устойчивы к электрическим разрядам, не растворяют полимерные материалы. Кроме того, известно, что фторорганические жидкости термоустойчивы и невзрывоопасны. Их диэлектрическая проницаемость изменяется в широких пределах, что позволяет их использовать как в качестве среды в накопителях энергии, так и в качестве изоляции в компактных высоковольтных устройствах.

2.3.2. Твердые диэлектрики

Среди кристаллических веществ в качестве объектов предлагаются монокристаллы щелочно-галогенидной группы (KCl, KBr), монокристаллы иттрий-алюминиевого граната, легированного неодимом (Nd^{3+} : YAG), и монокристаллы лейкосапфира ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$).

ЩГК — традиционные модельные объекты для исследования пробоя. Они обладают простейшим типом кристаллической решетки, их физические свойства хорошо изучены, благодаря чему закономерности пробоя этих кристаллов лучше всего исследованы как теоретически, так и экспериментально. Хорошая изученность, доступность и простота изготовления образцов делают ЩГК идеальным объектом для отработки новых экспериментальных методик, которые в дальнейшем можно применить к более сложным объектам.

ЩГК не применяются в технике как изоляторы. Тем не менее, результаты исследования наносекундного пробоя этих кристаллов могут иметь практическое приложение. ЩГК используются в оптике и лазерной технике, находят применение в качестве сцинтилляторов в детекторах ядерных излучений, где подвергаются воздействиям мощного импульсного излучения. Известно, что интенсивное облучение кристаллов пучком заряженных частиц может приводить к их пробоям, поэтому результаты исследования пробоя этих кристаллов могут иметь значение для решения проблемы радиационной и лучевой стойкости.

ЩГК являются относительно хрупкими кристаллами, из-за чего картины пробоя в них деградируют от последующего механического разрушения. Важно исследовать детальные картины пробоев в кристаллах, более прочных по сравнению со ЩГК, таких как иттрий-алюминиевый гранат и лейкосапфир. Выбор иттрий-алюминиевого граната обусловлен тем, что это широко распространенный материал квантовой электроники. Исследование пробоя кристаллов в целом может дать информацию, необходимую при конструировании твердотельных разрядников.

Образцы кристаллов щелочно-галогенидных соединений приготавливаются путем раскалывания исходных монокристаллических заготовок по плоскостям спайности. Образцы кристаллов, не обладающих спайностью (Nd^{3+} : YAG, лейкосапфир), вырезаются алмазным диском из заготовок и доводятся до нужного размера и качества поверхности при помощи алмазных планшайб. Каналы пробоя в монокристаллах формируются в определенных кристаллографических направлениях, что нужно учитывать при изготовлении образцов. Каналы анодного пробоя в KCl и KBr при нормальной температуре ориентированы в направлении $\langle 100 \rangle$. Некоторые характеристики диэлектрических кристаллов приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Физические характеристики кристаллов

Диэлектрик	M , г/моль	ρ , г/см ³	σ_B , МПа	v_L , км/с	ε , 1 МГц	$-\Delta H_{298}^0$, ккал/моль
KCl	74,55	1,9891	4,4	4,48	4,68	104,175
KBr	119,01	2,75	3,3	3,55	4,9	93,73
A-Al ₂ O ₃	101,94	3,974	41600	11,03	8,6	399,09
YAG	593,7	4,552	171–205	8,6	11,7	—

По соображениям практического характера можно также исследовать поликристаллические и гетерофазные диэлектрики (алунд, пористая керамика на основе оксидно-алюминиевого нанопорошка, пропитанная жидким диэлектриком). Пористая керамика, пропитанная жидкостью, может быть использована при изготовлении разрядных камер ИЭРД-установок. Однако для оценки перспективности конкретного инженерного решения требуется исследовать выбранные конструкционные материалы при воздействии на них коротких импульсов высокого напряжения. Пористая керамика производится в лаборатории импульсных процессов ИЭФ УрО РАН. Керамика получается одноосным квазиизостатическим прессованием нанопорошка оксида алюминия дисперсностью 14 и 30 м²/г с последующим отжигом в течение 1 ч на воздухе при $T = 1600$ °С.

Глава 3. Пространственно-временные и энергетические характеристики наносекундного пробоя жидких диэлектриков

В главе приведены примеры измерений скорости роста каналов пробоя в жидкостях, оценка энергии плазмообразования, зависимость времени пробоя от межэлектродного промежутка. Предложены аппроксимационные уравнения, удовлетворительно описывающие характер зависимости $d(r)$ для фторсодержащих жидкостей.

3.1. Скорость распространения канала пробоя

Для пробоя жидкостей в однородных полях при напряженностях, близких к пробивным, используют понятия времени формирования разряда t_{ϕ} и времени статистического запаздывания разряда t_z , которые связаны с представлениями об ударной ионизации. *Статистическое запаздывание* в данном случае означает время от момента достижения амплитудой импульса величины пробивного напряжения для режима длительного приложения напряжения и до момента начала формирования пробоя. При напряжениях, многократно превышающих пробивное, статистического запаздывания нет, а время формирования называют *активным запаздыванием*. Статистическое время запаздывания описывается экспоненциальным законом

распределения, а время формирования разряда — нормальным распределением.

При пробое жидкости даже в сильно перенапряженных промежутках имеет место разброс значений времени формирования канала. Этот разброс отражает стохастический характер развития канала пробоя в жидкости. Однако разбросы значений времени пробоя могут быть вызваны и внешними причинами. Например, при пробое одного образца серией импульсов на время формирования канала может влиять изменение в состоянии этого образца, вызванное предыдущим разрядом. В процессе разряда в жидкости происходят электрохимические процессы, приводящие к разложению исходного вещества. Продукты разложения при этом могут иметь повышенную проводимость. Присутствие проводящих частиц искажает результаты времени пробоя, поэтому их следует удалить из межэлектродного промежутка. Кроме этого, возможно образование пузырьков, которые также необходимо удалить во избежание развития пробоя в газовых полостях. Последнее особенно важно в случае относительно вязких жидкостей, в частности, трансформаторного и вакуумного масел. Для определения скорости восстановления состояния образца в межэлектродном промежутке после пробоя необходимо сделать предварительные испытания, например, трансформаторного масла.

Такие испытания можно провести в 2 серии по 10–100 выстрелов при $d = 1$ мм:

- в первом случае разряды следуют друг за другом с интервалом в 2 минуты, восстановление промежутка идет только за счет конвекции;
- во втором случае образец перемешивается в ячейке в течение 10 секунд, время между разрядами составляет 2 минуты.

Результаты таких испытаний можно представить в виде графиков зависимостей времени разряда от порядкового номера выстрела и гистограмм распределения числа выстрелов по вре-

мени пробоя (см. рис. 3.1). Из графиков и гистограмм видно, что перемешивание жидкости в целом приводит к тому, что разброс значений времени пробоя незначительно сокращается.

Среднее значение времени пробоя для масла с перемешиванием и без перемешивания при $d = 1$ мм составляет $(49,0 \pm 1,3)$ и $(48,6 \pm 1,2)$ нс соответственно. Можно сделать вывод, что в предлагаемом режиме следования разрядов в межэлектродном промежутке происходит самовосстановление свойств масла; перемешивание жидкости критического влияния на воспроизводимость результатов не оказывает.

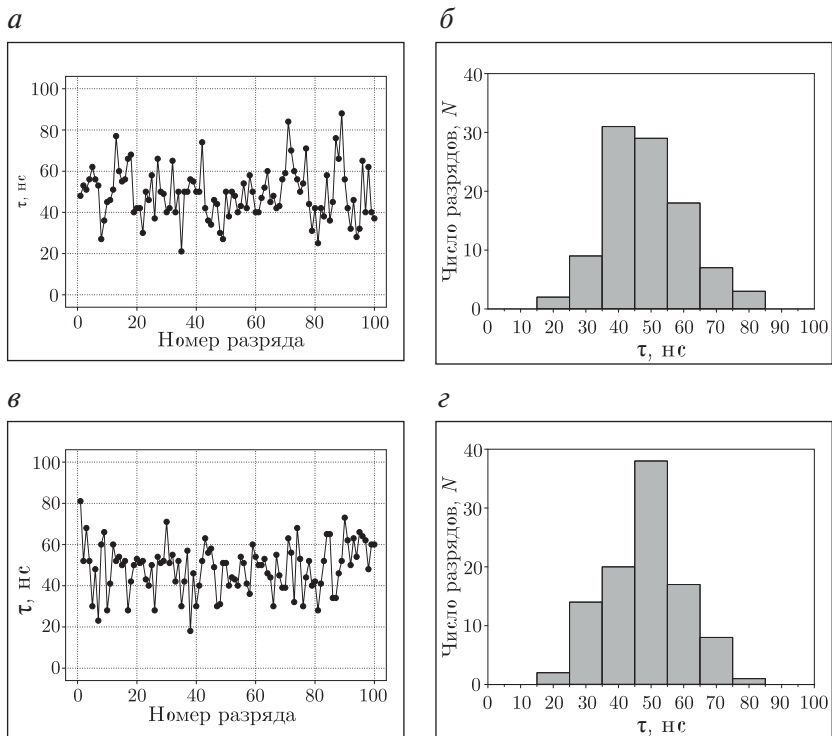


Рис. 3.1. Время пробоя трансформаторного масла при $d = 1$ мм:

a, *б* — без перемешивания; *в*, *г* — с перемешиванием

Среднеквадратичное отклонение результата измерения для числа разрядов $N = 40$ примерно в 2 раза меньше, чем при $N = 10$. Для испытания трансформаторного масла при других межэлектродных расстояниях рекомендуется объем выборки $N = 30$ (для некоторых d объем выборки может быть увеличен до 50).

Разряды приводят к возникновению микрократеров на поверхности катода (рис. 3.2) размером порядка десятков микрометров. При межэлектродном промежутке $d = 1$ мм точки замыкания канала промежутка расположены на катоде внутри области размером 1–1,5 мм. Замыкание разряда в местах, лежащих на некотором расстоянии от центра катода, является одной из причин разброса значений времени пробоя. Точки, далеко выходящие за область максимальной концентрации, соотносятся с точками на графиках, сильно выбивающимися в область больших времен пробоя, и поэтому могут быть отброшены как промахи. При числе разрядов, равном 600, на поверхности наблюдаются неоднородности с характерными размерами порядка сотен микрон. Для большей точности катод рекомендуется полировать после каждых 300 разрядов.

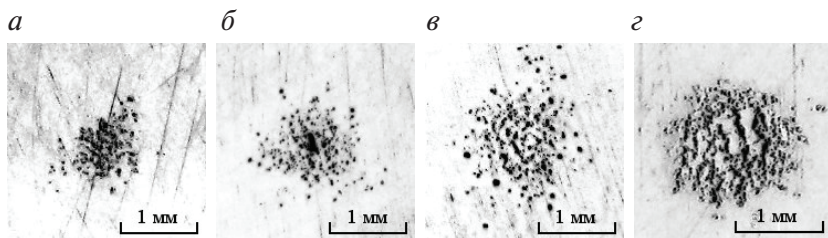


Рис. 3.2. Вид поверхности плоского алюминиевого катода после разрядов в трансформаторном масле при $d = 1$ мм:
 а — 100 разрядов; б — 200 разрядов; в — 300 разрядов; г — 600 разрядов

На рис. 3.3 представлены графики времени формирования канала пробоя для трансформаторного масла в интервале межэлектродных промежутков 0,25–4 мм. На графиках приведены

минимальные значения времени пробоя для каждого межэлектродного промежутка и средние значения с соответствующими среднеквадратичными погрешностями для доверительной вероятности 95 %.

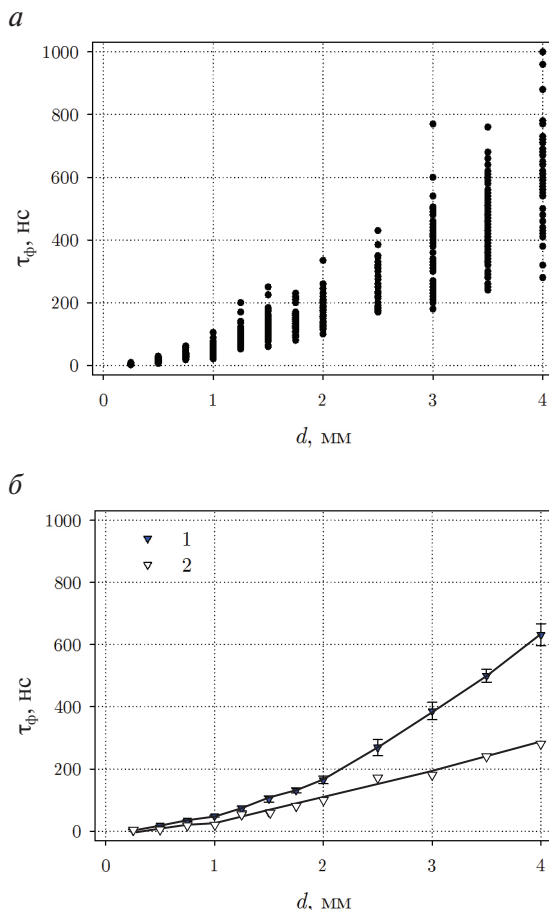


Рис. 3.3. Зависимость времени пробоя свежего трансформаторного масла от длины межэлектродного промежутка (730 разрядов):

a — общий разброс значений; *б* — средние (1) и минимальные (2) значения времени пробоя

График времени пробоя характеризуется достаточно большими разбросами значений времени пробоя, особенно при $d > 2$ мм. Разбросы значений времени пробоя обусловлены стохастической природой распространения канала в жидкости. Кроме этого фактора, дополнительным фактором, вносящим неопределенность в развитие канала, является режим пробоя при многократных отражениях наносекундного импульса от конца разомкнутой линии.

Массив экспериментальных точек ограничен минимальным временем пробоя τ . По минимальному значению времени пробоя можно определить максимальную скорость развития канала

$$V_{\max} = \frac{d}{\tau_{\min}} \quad (3.1)$$

при данном межэлектродном расстоянии. Максимальную скорость (а не среднюю) можно использовать в расчетах и оценках, в которых фигурирует скорость развития канала пробоя. Это обусловлено тем, что значения времени пробоя $\tau_{\phi} > \tau_{\min}$, имеющие место в силу стохастического характера разряда в жидкости, соответствуют некоторым эффективным длинам пути разряда, отличающимся от длины межэлектродного промежутка. В дальнейшем будем оперировать именно этой максимальной скоростью.

График зависимости среднего и минимального времени пробоя, а также средней и максимальной скоростей развития пробоя от длины межэлектродного промежутка в трансформаторном масле приведен на рис. 3.4. Среднеквадратичные погрешности времени формирования пробоя указаны для доверительной вероятности 95 %.

На графиках зависимостей $\tau_{\min}(d)$ и $\tau(d)$ можно выделить линейные участки, но в целом эти зависимости нелинейные. Начальный участок зависимости $\tau(d)$ ($\tau < 20$ нс) практически у всех жидкостей представляет собой прямую, проходящую через начало координат. При $\tau > 20$ нс (для разных жидкостей эта область может соответствовать межэлектродным расстояниям от 1 до 2 мм) зависимости $\tau_{\min}(d)$ и $\tau(d)$ у большинства жидко-

стей также имеют близкий к линейному характер в пределах достаточно широкого интервала межэлектродных расстояний (вакуумное масло, вода, глицерин и т. д.), но участки этих прямых не проходят через начало координат. Этим участкам можно поставить в соответствие дифференциальные скорости, равные $\Delta d/\Delta t$. В табл. 3.1 приведены численные значения максимальной (V_{\max}) и средней (V) скорости развития канала для начальных участков.

Таблица 3.1

**Скорость распространения канала импульсного пробоя
в диэлектрических жидкостях**

Диэлектрик	$d < 2$ мм		$d > 2$ мм	
	V_{\max} , км/с	V , км/с	V_{\max} , км/с	V , км/с
Перфторэйкозан	469	250	50	20
ПМС-200	350	155	111	75
ПЭС-1	200	133	12	107
Пропиловый эфир перфторвалериановой кислоты	138	99	40	32
Нитрил перфторпеларгоновой кислоты	123	61	44	27
Этиловый спирт	120	50	20	15
Глицерин	100	12	30	12
Дистиллированная вода	100	60	40	30
Изопропиловый спирт	100	58	15	15
Метилловый эфир перфторэнантовой кислоты	97	75	32	36
Трансформаторное масло	49	26	12	9
Вакуумное масло ВМ-1	38	26	14	9

Скорость распространения канала пробоя во фторорганических жидкостях выше, чем в спирте, воде, глицерине, трансформаторном и вакуумном маслах. Отличительной чертой ЖДФ является наличие в их составе фтора, имеющего сильное сродство к электрону. Различия среди ЖДФ меньше, чем различия между жидкостями, не имеющими в составе фтора, и каждой

из ЖДФ. При этом ЖДФ имеют различную структуру (линейные молекулы, молекулы с бензольным кольцом, циклические, содержащие либо не содержащие кислород, серу, азот), молекулярную массу, диэлектрическую проницаемость. Химическая структура фторорганических жидкостей приведена на рис. 3.5.

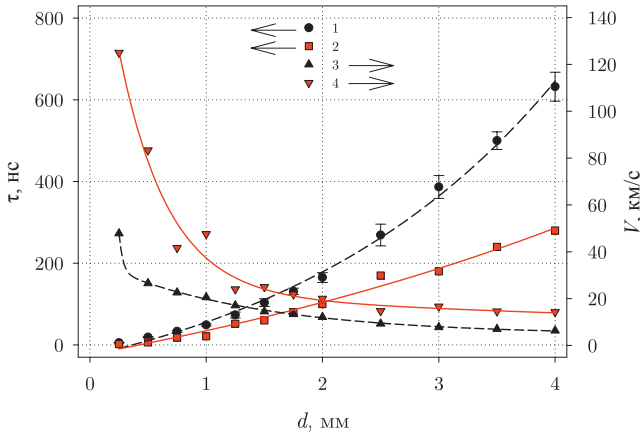
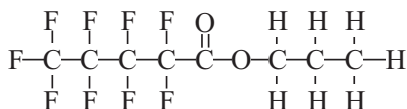


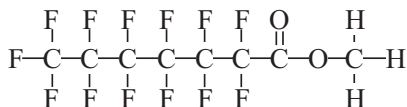
Рис. 3.4. Зависимость времени и скорости формирования канала пробоя трансформаторного масла от длины межэлектродного промежутка (730 разрядов):

1 — среднее время пробоя; 2 — минимальное время пробоя; 3 — средняя скорость роста канала; 4 — максимальная скорость роста канала

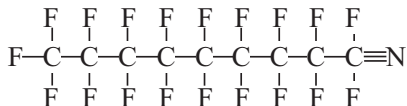
В ряде теорий считается, что существует связь между электрической прочностью, скоростью распространения канала пробоя в жидкости и ее молекулярной структурой [2]. Например, установлена линейная зависимость электрической прочности от длины молекулярной цепи для предельных углеводородов. Длина молекулярных цепей исследованных ЖДФ лежит в диапазоне 10–100 Å, однако, максимальная скорость распространения канала пробоя в них отличается незначительно. При этом есть основание полагать, что длина цепи влияет на диапазон разброса значений времени пробоя.



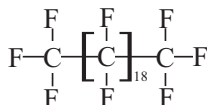
Пропиловый эфир перфторвалериановой кислоты



Метилвый эфир перфторэнантовой кислоты



Нитрил перфторпеларгоновой кислоты



Перфторэйкозан

Рис. 3.5. Химическая структура фторорганических жидкостей

Среди жидкостей три имеют относительно длинные молекулы: перфторэйкозан (20 атомов углерода в цепочке) 4,8,...окса-перфторпентадодекан (63 атома углерода в цепочке) и ПМС-200 (около 80 атомов кремния в цепочке). Значения времени пробоя этих жидкостей, имея широкий диапазон значений при одном межэлектродном промежутке, распределены по закону, близкому к закону нормального распределения.

Характерной особенностью разброса значений времени пробоя для 1–4-дисульфторид-перфторбутана и 1–6-дисульфторидперфторгексана (которые имеют относительно короткие молекулы) является то, что значения времени пробоя распределены ненормально.

3.2. Плазмообразование в канале пробоя

Расчетная напряженность поля на игле может превышать 30 МВ/см, а скорости роста каналов многократно превышают скорость звука в веществах, что говорит о том, что в условиях такого эксперимента реализуется *ионизационный механизм пробоя с анода*.

Мы можем оценить энергию создания проводящего канала. Для этого необходимо учесть энергетические затраты на образование плазмы из молекул жидкости, которые можно представить в виде [2]

$$W_c = \frac{\rho N_A}{M} (W_{dis} + W_{ion}) = \frac{\rho N_A}{M} \left(\sum_{i=1}^a n_i D_i + kI \right), \quad (3.2)$$

где ρ — плотность вещества; M — молекулярная масса вещества; N_A — число Авогадро; W_{dis} — энергия диссоциации и ионизации атомов одной молекулы вещества; W_{ion} — энергия ионизации атомов одной молекулы вещества; n_i — количество связей i -го типа в молекуле вещества; a — число типов связей; D_i — энергия диссоциации связи i -го типа; k — количество атомов с наименьшим потенциалом ионизации; I — наименьший из потенциалов ионизации атомов, составляющих молекулу.

Рассчитанная по формуле (3.2) удельная энергия каналообразования представлена в табл. 3.2.

Рассмотрим на примере пропилового эфира перфторвалериановой кислоты определение удельной энергии каналообразования.

Определим энергию диссоциации $\sum_{i=1}^a n_i D_i$. В выбранном веществе есть химические связи следующих типов: H_2C-H (1); $HC-H$ (3); $C-H$ (3); $C-C$ (6); $C=O$ (1); $C-O-C$ (1); F_2C-F (1); $FC-F$ (4); $C-F$ (4) (см. рис. 3.5). Энергии диссоциации связей

этих типов равны, ккал/моль: 87; 102,8; 81; 141,6; 257,27; 180; 116; 120 и 130,2. Получаем, что для диссоциации одного моля этого вещества необходимо затратить 3402 ккал.

Таблица 3.2

Удельная энергия каналаобразования в диэлектрических жидкостях

Диэлектрик	$W_c, 10^5 \text{ Дж/см}^3$
Перфторэйкозан	1,04
ПМС-200	0,63
ПЭС-1	0,63
Пропиловый эфир перфторвалериановой кислоты	0,99
Нитрил перфторпеларгоновой кислоты	0,93
Этиловый спирт	0,81
Глицерин	1,31
Дистиллированная вода	2,67
Изопропиловый спирт	0,94
Метилловый эфир перфторэнантовой кислоты	0,97
Феноловый эфир перфторэнантовой кислоты	0,94
4,8,...оксаперфторпентадодекан	0,94

Определим теперь энергию ионизации kI . Молекула рассматриваемого вещества состоит из атомов С, Н, F, и О. Потенциал однократной ионизации равен, эВ: углерода — 11,3; водорода — 13,6; фтора — 17,4; кислорода — 13,6. Поскольку наименьшим потенциалом ионизации обладает углерод, именно он будет ионизован в первую очередь. Возникшие ионы и электроны вместе с нейтральными частицами образуют плазму. Дальнейшая ионизация (ионизация атомов другого типа, многократная ионизация и т. д.) будет изменять это состояние только количественно, поэтому для определения W_{ion} достаточен расчет только для углерода. Получаем, что энергия ионизации одного моля равна 2085 ккал. Сложив получившиеся числа и умножив сумму на отношение плотности к молекулярной массе (см. табл. 3.2), получаем удельную энергию каналаобразования для пропилового эфира перфторвалериановой кислоты, равную 23,6 ккал/см³, или $0,99 \cdot 10^5 \text{ Дж/см}^3$.

Трансформаторное и вакуумное масла являются смесями углеводородов различных классов и не имеют определенный химический состав. Удельную энергию каналаобразования для этих жидкостей точно определить нельзя. Поскольку ПМС и ПЭС это смеси полимеров с различными длинами цепей, то для расчета необходимо брать такое число звеньев полимера, при котором молекулярная масса получается лежащей в диапазоне, характерном для конкретного диэлектрика. Например, для ПЭС-1 можно взять цепочку из 3 атомов Si.

Удельная энергия каналаобразования для фторорганических жидкостей лежит в пределах $(0,63-1,41) \cdot 10^5$ Дж/см³. Скорость развития канала есть ничто иное, как скорость продвижения фронта ионизации. Она должна коррелировать с характеристиками плазмообразования. Однако корреляции между максимальными и средними скоростями развития разряда и удельной энергией каналаобразования не наблюдается. Например, средние и максимальные скорости развития канала в этиловом спирте существенно меньше, чем во фторорганических соединениях, но они имеют сопоставимые удельные энергии каналаобразования. Это говорит о том, что затраты на плазмообразование в канале оказываются больше, чем рассчитываемые по формуле (3.2).

Важной пространственно-временной характеристикой процесса пробоя является подвижность носителей заряда. Подвижность можно рассчитать по скорости распространения канала пробоя:

$$\mu = \frac{d}{\tau_f E} = \frac{V_d}{E}, \quad (3.3)$$

где d — длина межэлектродного промежутка; τ_f — время формирования канала пробоя; V_d — дрейфовая скорость носителей заряда, E — напряженность электрического поля на фронте развивающегося канала.

Известные значения подвижности носителей заряда в жидкостях отличаются на несколько порядков. Например, в сжи-

женных инертных газах подвижность электронов достигает сотен $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, в то время как для органических жидкостей она относительно низкая и составляет $10^{-3} - 10^{-2} \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

В нашем случае скорости роста канала достигают сотен километров в секунду. Для того чтобы обеспечить большие скорости разряда, подвижность носителей при $E \sim 10^6 \text{ В/см}$ должна быть много больше, чем это имеет место при относительно низких напряженностях.

Если воспользоваться формулой $V_d = \mu E$ применительно к результатам, полученным при наносекундном пробое, то получатся более высокие значения μ . Например, для фенолового эфира перфторвалериановой кислоты при расчетной напряженности поля иглы в конфигурации «острие — плоскость», равной $5 \cdot 10^7 \text{ В/см}$ (для $d = 0,5 \text{ мм}$), получится подвижность $0,28 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Похожие значения получатся и для трансформаторного масла при максимальных скоростях развития канала пробоя (при $d = 0,25 \text{ мм}$). Однако формула (3.3) может быть использована не всегда. Например, скорость роста канала с анода в воде всегда выше дрейфовой скорости носителей. Числа, получаемые расчетом по выражению (3.3), соответствуют подвижности области положительного объемного заряда, который образуется в окрестности головки канала.

Обратимся снова к зависимости $\tau(d)$. Ее нелинейный характер может быть обусловлен несколькими различными факторами.

1. Изменение типа разрядной структуры. В литературе описаны разрядные структуры различных типов, отличающиеся формой и скоростью развития. Разрядные структуры могут расти толчкообразно, увеличиваясь на отдельных участках со скоростями порядка десятков километров в секунду, однако средняя скорость их во всем межэлектродном промежутке может быть заметно меньше. При этом скорость максимальна вблизи электрода, с которого инициирован разряд. Разрядные структуры имеют различную степень разветвленности.

2. Существование некоего критического расстояния, в пределах которого вблизи острия зона ионизации создается быстрее, чем в области головки развившегося канала. Это может быть связано с процессами на микровыступах на поверхности острия. Из литературы известно, что инициирование разряда и его развитие могут отличаться по своей природе даже в одном акте пробоя.

3. Существование критического времени (связанного, например, с процессами релаксации плазмы в канале), в течение которого развитие канала в межэлектродном промежутке идет быстрее, чем на последующих этапах.

4. Влияние пульсирующего характера действующего напряжения и постепенного затухания отраженных импульсов.

Место, с которого начинается отклонение от линейности, соответствует времени около 10–20 нс, то есть длительности одного импульса либо одного импульса с отражением. Это дает основание полагать, что наиболее вероятен последний сценарий. Рассмотрим этот процесс подробнее.

На рис. 3.6 показаны графики $\tau(d)$ двух жидкостей в области значений τ до 20 нс.

Видно, что экспериментальные точки в диапазоне до 20 нс удовлетворительно аппроксимируются участками параллельных прямых, отстоящих друг от друга по оси ординат на 3–5 нс. Отрезок, соответствующий времени более 20 нс (2-е отражение), уже не является параллельным первому. Если соединить концы этих отрезков между собой, можно увидеть, что происходит постепенное уменьшение дифференциальной скорости с увеличением τ (и с увеличением d). Предполагается, что это обусловлено потерями энергии на создание канала во время действия первого импульса и уменьшением действующего напряжения в головной части растущего канала за счет разнесения отраженных импульсов во временной области. Прослеживая ход зависимости вплоть до сотен наносекунд, можно видеть, что «накопление» потерь приводит к нелинейному возрастанию времени пробоя.

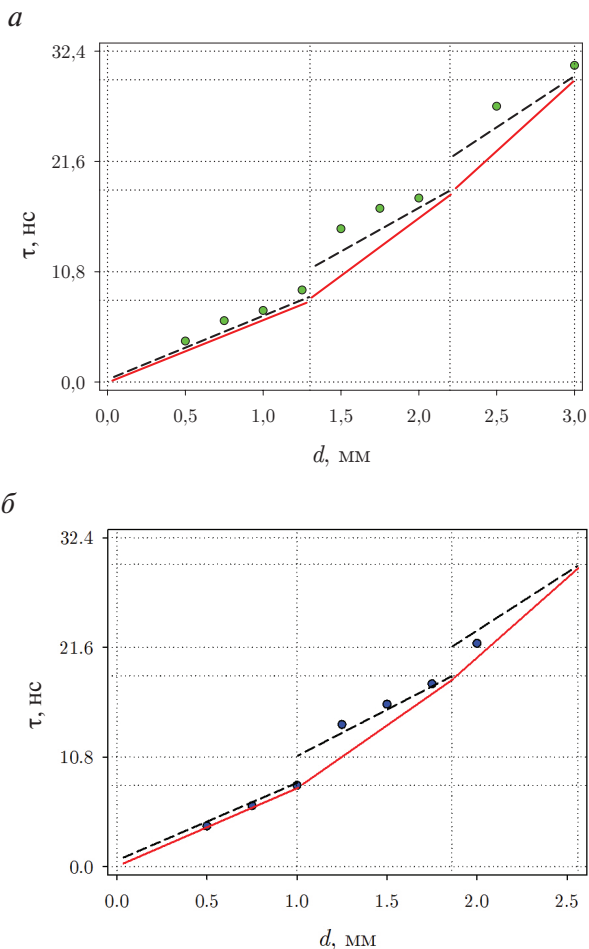


Рис. 3.6. Зависимость времени пробоя от длины межэлектродного промежутка для значений $\tau_{\phi} < 32$ нс:

a — метиловый эфир перфторэнантовой кислоты; *б* — феноловый эфир перфторвалериановой кислоты

Фактором уменьшения скорости роста канала может быть образование боковых ответвлений. На основании данных о ско-

рости роста каналов можно предположить, что в условиях данного эксперимента реализуются так называемые разрядные структуры 3-го либо 4-го типа. Разрядные структуры 3-го типа имеют древовидную форму, состоят из 1–2 ветвей диаметром 60–90 мкм, развиваются со скоростями десятков километров в секунду. Так, в перфторированных соединениях наблюдаются разрядные структуры 3-го типа, имеющие скорость около 30 км/с. Разрядные структуры 4-го типа являются слабоветвящимися, а вершина *движется с ускорением*, средняя скорость составляет более 100 км/с. Это дает основание применить в качестве грубой оценки приближение линейного канала.

При этом следует иметь в виду, что даже минимальные значения времени пробоя, полученные в эксперименте, могут соответствовать искривленным трекам, имеющим длину больше длины межэлектродного промежутка. Вероятно, такой подход будет более или менее обоснованным для тех жидкостей, у которых средняя и максимальная скорости развития канала пробоя отличаются незначительно и разбросы значений времени пробоя относительно невелики.

Известно, что канал в жидкости, инициированный с положительного острия, при приближении к катоду растет с ускорением из-за усиления поля на кончике. В то же время для «быстрых» каналов скорость распространения увеличивается не очень сильно из-за того, что в них не успевает происходить полная релаксация заряда. За время действия одного импульса из цуга (т. е. за 8 нс) канал преодолевает доли миллиметра, поэтому для нашей экспериментальной ситуации, вероятно, имеет место неполная релаксация заряда в канале и, следовательно, канал остается хорошо проводящим ко времени начала действия отраженного импульса.

Глава 4. Пространственно-временные и энергетические характеристики наносекундного пробоя твердых диэлектриков

Вданной главе предлагается подход к определению скорости роста канала в твердых веществах, тока и плотности тока формирования канала пробоя на основании результатов измерения времени пробоя, анализируется микроструктура каналов наносекундного пробоя в кристаллах. Предлагаются методы оценки энергозатрат на плазмообразование, оценки давления в канале пробоя. На основании измерений тока ионной компоненты пучка частиц, истекающих из канала объемного пробоя и пробоя по поверхности кристалла, делаются оценки степени ионизации вещества в канальной плазме.

4.1. Скорость распространения канала пробоя

Ранее было показано (глава 3), что при воздействии на жидкость цуга отраженных импульсов время пробоя будет возрастать нелинейно с увеличением толщины образца. Скорости развития канала на первых отражениях лежат в широком диапазоне (20—200 км/с), равно как и максимальные скорости на первых отражениях (50—450 км/с). Такое существенное отличие в скоростях развития канала позволило разделить эти жидкости условно на два класса: «медленные» и «быстрые». Анализ соотношения

удельной энергии каналаобразования и скорости роста канала для жидкостей не демонстрирует между ними явной зависимости.

Распространение канала пробоя представляет собой продвижение фронта ионизации, т. е. скорость развития канала есть не что иное, как быстрота преобразования вещества в канале пробоя в плазму. Таким образом, скорость роста канала должна зависеть от удельной энергии каналаобразования. Из литературы известно, что в кристаллических материалах скорости развития канала пробоя могут достигать 1000–3000 км/с.

4.1.1. Скорость распространения канала пробоя в керамических материалах, пропитанных диэлектрическими жидкостями

Возьмем три жидкости, сильно отличающиеся по свойствам и характеру пробоя: трансформаторное масло (наименьшая скорость роста канала); пропиловый эфир перфторвалериановой кислоты (каналы развиваются относительно быстро); перфторэйкозан (большой разброс значений времени пробоя и повышенная вязкость). Этими жидкостями пропитываются образцы пористой керамики, полученной прессованием нанопорошка оксида алюминия. Для сравнения возьмем образцы плотной (непористой) оксидно-алюминиевой керамики (алунд) и монокристалл лейкосапфира, имеющий такой же химический состав (Al_2O_3).

Из литературы известно, что пористые материалы демонстрируют необычные качества при воздействии электрических импульсов. Так, для диэлектриков с повышенной пористостью наблюдается нелинейная зависимость пробивной прочности от толщины и не наблюдается эффект полярности [5]. Известно об увеличении импульсной электрической прочности трансформаторного масла в 2–3 раза при добавлении в жидкий диэлектрик частиц керамики. Это происходит за счет того, что частицы влияют на предпробивной процесс в жидкости: ограничивают размер пузырьков, гасят течения, увеличивают вязкость.

Для указанных материалов измеряются значения времени пробоя и определяются скорости формирования каналов. Пример зависимости времени анодного пробоя при напряжении 140 кВ в образцах пористых керамик, пропитанных диэлектрическими жидкостями, и плотной керамики от толщины образцов приведен на рис. 4.1. Точка на графике соответствует среднему значению по 5–10 испытаниям для фиксированной толщины образца. На графиках приведены также кривые для трансформаторного масла.

Из графиков видно, что близкий к линейному характер зависимости времени пробоя от толщины образца имеет место только в интервале 0–10 нс, который соответствует длительности импульса генератора, то есть ситуации, когда пробой наступает до прихода отраженного импульса. При $\tau > 10$ нс характер зависимости изменяется в сторону уменьшения средней скорости, при этом имеет место существенный разброс значений времени задержки пробоя. Результаты сведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Скорости распространения каналов пробоя в пористой керамике Al_2O_3 , пропитанной жидкостями

Диэлектрик	Пористость, %	$V_{\text{диф}}, 10^3 \text{ м/с, при } \tau < 10 \text{ нс}$	$V_{\text{диф}}, 10^3 \text{ м/с, при } \tau > 10 \text{ нс}$
Трансформаторное масло	—	27	20
Перфторэйкозан	—	250	29
Пропиловый эфир перфторвалериановой кислоты	—	99	94
Нанокерамика, пропитанная трансформаторным маслом	44	60	13
Нанокерамика, пропитанная трансформаторным маслом	34	60	2
Нанокерамика, пропитанная пропиловым эфиром перфторвалериановой кислоты	34	100	30
Нанокерамика, пропитанная перфторэйкозаном	34	100	30
Алунд	—	100	70
Лейкосапфир	—	120	100

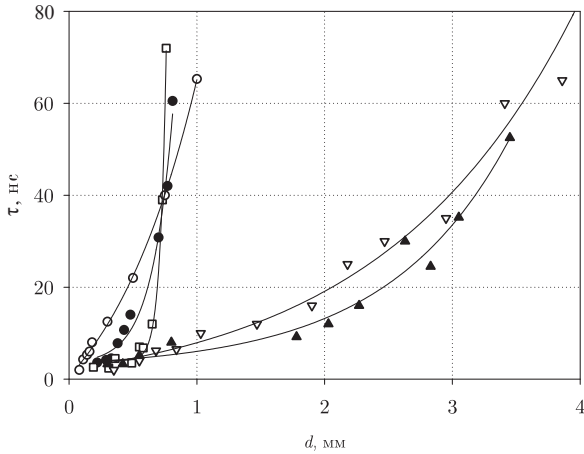
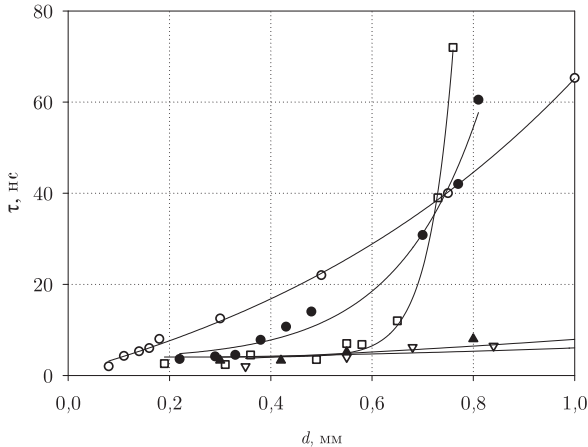
a*б*

Рис. 4.1. Зависимость времени формирования канала пробоя от толщины образцов (в разных масштабах):

○ — трансформаторное масло; ● — нанокерамика пористостью 44%; □ — нанокерамика пористостью 34%; ▲ — алунд; ▽ — лейкосапфир; *a* — при длинах межэлектродного промежутка до 4 мм; *б* — при длинах межэлектродного промежутка до 1 мм

В коротких промежутках и при $\tau < 10$ нс наибольшая средняя скорость роста канала наблюдается во фторорганических жидкостях (~ 140 км/с), значения сопоставимы со скоростью в монокристаллах лейкосапфира (~ 120 км/с).

Наиболее медленно на начальном участке канал растет в трансформаторном масле, однако уже при $\tau > 30$ нс керамика, пропитанная трансформаторным маслом, пробивается за большее время, чем само масло. Это достаточно неожиданный результат, поскольку известно, что при длительностях импульса менее 10^{-5} с происходит пересечение вольт-секундных характеристик жидких и твердых диэлектриков, в результате чего при коротких импульсах твердая изоляция оказывается менее электрически прочной [1]. На основании этого эффекта выработаны рекомендации по использованию данных электрической прочности твердой изоляции при расчете изоляционных конструкций, в которых используется жидкость в качестве изолятора, а твердый диэлектрик — в качестве конструкционного материала [2].

В керамике, пропитанной жидкостями с относительно высокими скоростями развития пробоя — пропиловым эфиром перфторвалериановой кислоты и перфторэйкозаном, при $\tau > 30$ нс также наблюдается более медленный рост канала по сравнению с жидкостью — наполнителем.

На основании рассмотрения результатов трех различных по скорости пробоя жидких наполнителей можно сделать вывод, что в пористой оксидно-алюминиевой керамике, пропитанной диэлектрической жидкостью, в режиме многократных отражений наносекундного импульса канал пробоя развивается медленнее, чем в сплошной керамике и монокристалле такого же химического состава, и медленнее, чем в наполняющей пористый образец жидкости в свободном состоянии. Таким образом, при воздействии многократно отраженным импульсом собственные пробивные свойства кристаллической матрицы в составе сложного диэлектрика не имеют решающего значения, если его толщина в несколько раз боль-

ше, чем толщина образца, пробиваемого за время действия единичного импульса.

Важный для практики вывод заключается в том, что гетерогенная система из пористой керамики и трансформаторного масла выдерживает без пробоя воздействия в диапазоне времен до 100 нс при напряжениях до 140 кВ. Такая композиция может быть рекомендована к использованию в качестве конструкционного материала в разрядной камере плазмогенератора на жидком рабочем теле.

4.1.2. Скорость распространения канала пробоя в монокристаллах

Для оценки скорости роста каналов пробоя можно использовать метод осциллографирования напряжения и тока. Пример зависимости скорости роста от толщины образцов приведен на рис. 4.2.

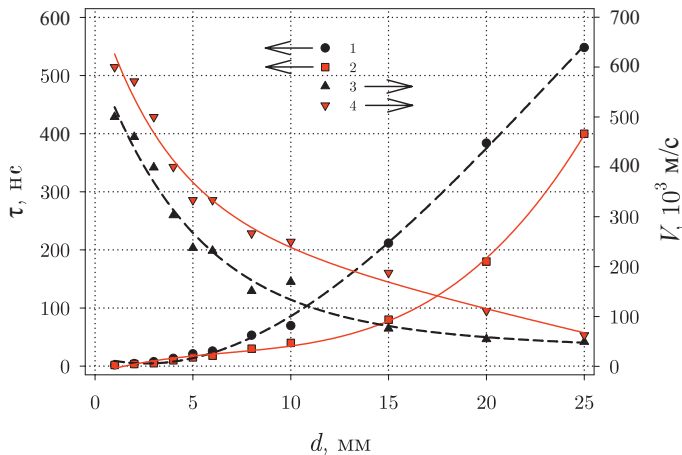


Рис. 4.2. Зависимость времени и скорости формирования канала пробоя кристаллов от толщины образца для хлорида калия (KCl):

1 — среднее время пробоя; 2 — минимальное время пробоя; 3 — средняя скорость роста канала; 4 — максимальная скорость роста канала

В данном случае наблюдается картина, аналогичная пробоем жидкостей. Зависимость времени развития канала пробоя кристалла от толщины образца при $\tau > 10$ нс оказывается нелинейной. Например, при толщине образцов 25 мм в KCl средняя скорость роста канала в 10 раз меньше, чем для образцов, пробиваемых за время действия одного импульса. Наибольшее падение скорости развития канала пробоя происходит уже на первых отражениях. Средняя скорость развития канала пробоя в образцах, пробиваемых за один импульс (т. е. за время меньше 8 нс), составляет 460 км/с. Скорости распространения каналов пробоя для разных участков (рис. 4.2) представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Скорости распространения каналов пробоя в кристаллах

Диэлектрик	$\langle V_0 \rangle, 10^3 \text{ м/с}$		$W_c, 10^4 \text{ Дж/см}^3$
	$\tau < 10 \text{ нс}$	$\tau > 10 \text{ нс}$	
KCl	460	240	3,07
KBr	360	185	2,52
$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	130	70	—
$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	120	100	17,39

В целом скорости роста канала на первом импульсе во всех монокристаллах выше, чем в жидкостях (за исключением перфторэйкозана в очень коротких промежутках). Такое различие в скоростях развития канала пробоя в жидкостях и монокристаллах может быть обусловлено условиями для генерации свободных носителей заряда и их подвижностью. Высокие скорости развития канала пробоя (вплоть до 10^6 м/с) для простых соединений типа ШГК удовлетворительно объясняются в рамках модели каскадных оже-переходов. Отсутствие дальнего порядка в жидкости затрудняет перенос электронов от атома к атому по кратчайшему пути.

Нелинейный характер роста времени пробоя в зависимости от толщины образца может быть связан с уменьшением скоро-

сти формирования каждого последующего участка из-за падения напряжения на сопротивлении предыдущего участка. Информацию о сопротивлении канала можно получить, измерив ток, протекающий в цепи анода в процессе формирования канала.

Токи формирования каналов пробоя в монокристаллах можно определить по зависимости скорости формирования канала пробоя от напряжения. Они составляют, например, для KCl и KBr — 27 ± 5 А и 14 ± 5 А соответственно. Для определения тока брались значения скорости развития канала только для значений времени менее 8 нс (пробой одним импульсом, без отражений).

Погрешность определения тока при измерении скорости роста канала с балластным резистором достаточно велика (при $d = 3$ мм разница в определении времени пробоя в 1 нс по осциллограмме дает разницу в скорости в 100 км/с). Однако с уверенностью можно говорить, что это десятки ампер, а не миллиамперы, как это получено в некоторых ранних работах для KCl. Почти мгновенное возрастание напряжения до нескольких сотен киловольт приводит к высоким значениям скорости формирования канала. При напряжениях $U \sim 10$ кВ и относительно медленном его нарастании скорость роста канала ощутимо меньше, чем при напряжениях $U > 100$ кВ, следовательно, меньше и ток формирования канала. Если представить процесс роста канала как зарядку цилиндрического конденсатора с увеличивающейся емкостью (по мере продвижения канала в глубь образца), то при скорости 10^6 м/с ток должен быть не меньше 1 А, что и наблюдается в опыте.

Проведем оценку энерговклада в канал по ряду экспериментально полученных величин для ШГК. Известно, что при 150 кВ радиусы каналов в KCl и KBr равны соответственно 4 и 6,5 мкм. Плотность тока в каналах таких размеров будет составлять $5,4 \cdot 10^7$ и $1,1 \cdot 10^7$ А/см². Плотность энергии, вводимой в канал пробоя за время действия одного импульса, можно оценить по формуле:

$$\omega = \frac{UI_{\phi}\tau_{и}}{\pi r_{к}^2 d}, \quad (4.1)$$

где U — амплитуда импульса; I_{ϕ} — ток формирования канала пробоя; $\tau_{и}$ — длительность импульса; $r_{к}$ — радиус канала пробоя; d — толщина образца, пробиваемого за время $\tau_{и}$.

Для наших токов и размеров канала плотность энергии составит $2 \cdot 10^6$ Дж/см³ для КСІ и $0,3 \cdot 10^6$ Дж/см³ для КВг. Таким образом, в канал вводится плотность мощности порядка 10^{14} Вт/см³. При этом энергия каналаобразования для этих кристаллов равна, соответственно, $3 \cdot 10^4$ Дж/см³ и $2,52 \cdot 10^4$ Дж/см³. Полученные данные говорят о том, что в канал на этапе его формирования вводится энергия, значительно превышающая энергию каналаобразования, благодаря чему в канале пробоя возможно образование ионов с высокой степенью зарядности, в том числе высокоскоростных.

4.2. Микроструктура канала пробоя

Ранее было показано, что время развития канала будет возрастать нелинейно при увеличении толщины кристалла. При этом оно может достигать десятков и даже сотен наносекунд при толщине образца несколько сантиметров. Таким образом при воздействии одного из последовательности отраженных импульсов, которые действуют на образец с соответствующей средней скоростью, канал может продвинуться на несколько микрометров. Следовательно, мы можем получить структуру, которая будет отражать динамику развития канала вплоть до наносекундного разрешения.

Будем проводить дальнейшие эксперименты на хорошо изученном модельном объекте — монокристалле КСІ. Он очень удобен для наблюдения структуры канала пробоя, поскольку

ку имеет простую кубическую решетку и легко раскалывается по плоскостям спайности, что удобно для изготовления образцов требуемых размеров.

Монокристалл будем размещать в пробойной камере генератора так, чтобы его верхняя грань слегка выступала над поверхностью масла в воздухе (рис. 4.3). В нашем случае вершина растущего канала представляет собой границу линии передачи, следовательно, падающий импульс отражается от нее (см. рис. 4.4). Энергия при этом будет расходоваться на образование канала, а также будет теряться на отражениях, что приведет к последовательному уменьшению амплитуды отраженных импульсов.

Важно иметь некоторый зазор между корпусом и поверхностью кристалла. Он будет выполнять роль высокоомного балластного резистора. Его наличие обеспечит ограничение тока во время сильноточной стадии пробоя при выходе канала на эту поверхность. Таким образом можно предохранить от нарушений картину пробоя в приканальной области. Микроструктура образовавшихся каналов пробоя может быть исследована на оптических микроскопах. На рис. 4.5 изображен канал пробоя в KCl.

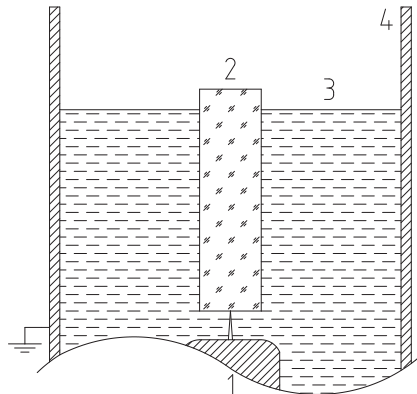


Рис. 4.3. Схема эксперимента по пробоя длинных образцов KCl:

- 1 — игловый анод; 2 — образец; 3 — трансформаторное масло;
4 — корпус генератора

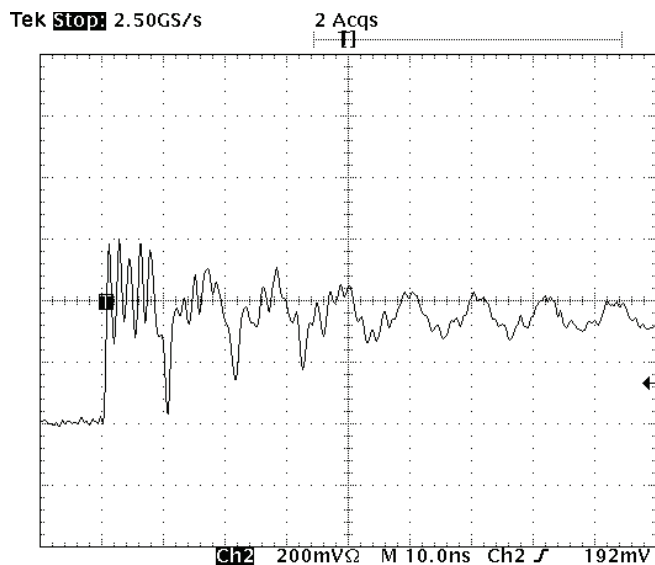


Рис. 4.4. Вид сигнала напряжения при многократном отражении импульса амплитудой 140 кВ от конца разомкнутой линии

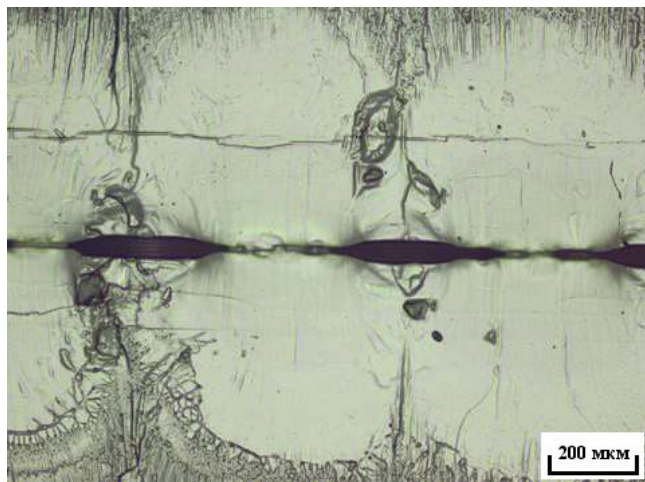


Рис. 4.5. Канал пробоя в монокристалле KCl

Из рис. 4.5 видно, что канал имеет сложную форму с характерными признаками. Обращает на себя внимание регулярная структура в средней части канала (ближе к аноду), представляющая собой чередование относительно широких и длинных (50 мкм в ширину, 500 мкм в длину) и узких (около 10 мкм в ширину) частей.

В условиях данного эксперимента скорость развития канала в КС1 для тонких образцов равна $(3-5) \cdot 10^7$ см/с, что соответствует прохождению каналом за время действия одного импульса расстояния 2–4 мм. Однако, учитывая, что время развития канала растет с увеличением толщины образца нелинейно, можно предположить, что средняя скорость развития канала в несколько раз меньше, то есть за время действия одного отраженного импульса канал продвигался на расстояние порядка сотен микрометров.

Самым вероятным объяснением такой пробойной структуры является образование каждого ее элемента за время действия одного отраженного импульса длительностью 8 нс. Такое предположение можно применить для временной привязки при рассмотрении сопутствующих процессов, если использовать характерный размер и форму элемента пробойной структуры.

Очевидно, что нет оснований говорить о постоянстве скорости развития канала при воздействии цуга отраженных импульсов, но в пределах длительности нескольких отражений это условие может выполняться, что дает основание считать, что периодические сужения и расширения канала представляют собой визуализацию изменения напряжения на пробойном промежутке, а их диаметр соответствует мгновенным значениям действующего напряжения.

Последовательность процессов в разрядном промежутке представляется следующей. Приходящий фронт импульса напряжения формирует «тонкую» часть канала диаметром 10 мкм, которая постепенно расширяется до стационарного диаметра 50 мкм при выходе напряжения на максимальное значение

(плоская часть импульса). При спаде напряжения на заднем фронте импульса, отраженного от проводящей вершины канала, диаметр снова уменьшается до значения 10 мкм. С приходом последующего отраженного от генератора импульса этот процесс происходит вновь, формируя следующий элемент картины пробоя. По обе стороны от «тонкой» части канала видна относительно гладкая поверхность раскрывшейся трещины, близкой по форме к окружности радиусом 500 мкм. На внешней границе этих областей наблюдаются микрокапли сконденсировавшегося вещества канала (их диаметр 3–5 мкм).

Следует отметить, что четкая граница и сохранение формы каждой из локальных трещин говорит о том, что последующие импульсы напряжения не изменяют их форму и размер существенным образом.

Вид пробойной структуры и результаты измерений указывают на то, что в условиях такого эксперимента процесс формирования канала пробоя под действием каждого приходящего импульса из последовательности происходит локально, непосредственно в момент прохождения фронта пробоя, и независимо от предыдущих, а наблюдаемая на фотографиях картина разрушения представляет собой визуализацию действия напряжения на пробойном промежутке. Эти выводы подтверждаются наличием узких участков канала, соответствующих моментам времени, когда из-за отражения пришедшего наносекундного импульса напряженность поля на вершине растущего канала понижается до минимально необходимой для электрического разрушения вещества образца.

4.3. Давление в канале пробоя

Геометрические характеристики канала пробоя можно использовать для расчетов и оценок других характеристик, таких как давление и радиальная напряженность поля в канале.

Если рассматривать канал пробоя в виде кольца, нагруженно-го по внутреннему контуру равномерно распределенными нормальными усилиями, то можно оценить давление в канале пробоя.

Можно пренебречь анизотропией образца. Тогда, учитывая, что отношение радиуса канала к радиусу образца (5 мм) много меньше отношения радиуса канала к глубине трещины, получаем следующее выражение:

$$P = \sigma_{\max} \frac{1 - \left(\frac{r_k}{r_0}\right)^2}{\left(\frac{r_k}{r_0}\right)^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{r_0}{r_t}\right)^2\right]} \approx \sigma_{\max} \left(\frac{r_t}{r_k}\right)^2, \quad (4.2)$$

где σ_{\max} — прочность на разрыв; r_k — радиус канала; r_0 — радиус образца; r_t — глубина образовавшейся трещины.

Сделаем оценку давления для канала в хлориде калия. Той части канала, радиус которой равен 5 мкм, соответствует трещина (область ближнего разрушения) глубиной около 500 мкм. Широкой части канала, радиус которой равен 25 мкм, соответствует глубина трещины около 250 мкм. Прочность на разрыв (предельное нормальное напряжение) σ_{\max} кристалла КС1 для кристаллографической плоскости {100} составляет $5 \cdot 10^6$ Па. Подставляя эти числа в формулу (4.2), получаем для участка канала радиусом 5 мкм давление $P = 5 \cdot 10^{10}$ Па, для участка канала радиусом 25 мкм давление $P = 5 \cdot 10^8$ Па.

Известно [13], что при изменении амплитуды импульса напряжения диаметр канала изменяется так, что радиальная напряженность поля на поверхности канала E_r оставалась величиной постоянной. Физический смысл этого условия заключается в том, что канал в процессе радиального расширения достигает диаметра, при котором $E_r \leq E_{\text{пр}}$, и больше не расширяется. Радиальную напряженность поля для полученных каналов можно оценить в приближении двухслойного цилиндрического конденсатора [4] по формуле:

$$E_{r_0} = \frac{U}{r_0} \cdot \frac{1}{\left(\ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right)}, \quad (4.3)$$

где E_{r_0} — радиальная напряженность электрического поля на стенке канала; U — действующее напряжение; r_0 — радиус канала; r_1 — радиус образца; r_2 — радиус разрядной камеры; ε_1 — диэлектрическая постоянная материала образца; ε_2 — диэлектрическая постоянная среды, в которой находится образец.

Учитывая, что отношение радиуса разрядной камеры к радиусу образца много меньше отношения радиуса образца к радиусу канала пробоя, получаем:

$$E_{r_0} = \frac{U}{r_0 \ln \frac{r_1}{r_0}}. \quad (4.4)$$

4.4. Параметры плазмы в канале пробоя

Известно, что разряд в объеме кристалла, а также разряд по поверхности являются источниками пучков быстрых частиц. На основании анализа характеристик частиц, истекающих из области разряда в вакуум (скорость, зарядовый состав, пропорции ионов различной зарядности и т. д.), могут быть получены более надежные оценки степени ионизации плазмы в самом канале пробоя. Регистрация этих частиц с помощью времяпролетного анализатора составляет основную экспериментальную задачу по определению энергетических характеристик пробоя.

Для корректного измерения параметров канальной плазмы следует использовать образцы, пробиваемые за время в пределах действия единичного импульса генератора (8 нс). По данным о времени пробоя кристаллов можно определить, что этому условию удовлетворяют пластины толщиной до 3 мм.

Толщина рекомендуемых образцов составляет 1 мм. Пластины КС1 и КВг такой толщины пробиваются за время 2 нс. Интенсивность высокоскоростной компоненты пучка для образцов толщиной 2 мм мало отличается от таковой в случае, когда толщина образцов составляет 1 мм, но при этом интенсивность низкоскоростной компоненты заметно больше (рис. 4.6). Первое обстоятельство может быть связано с тем, что область ускорения ионов до максимальных скоростей локализована в области вершины канала пробоя, а последнее — с тем, что истечение плазмы из канала большей длины требует больше времени. Высокоэнергетичная плазма из прианодной области истекает из канала в последнюю очередь и дает вклад в общий ток в виде относительно медленной компоненты скоростного спектра.

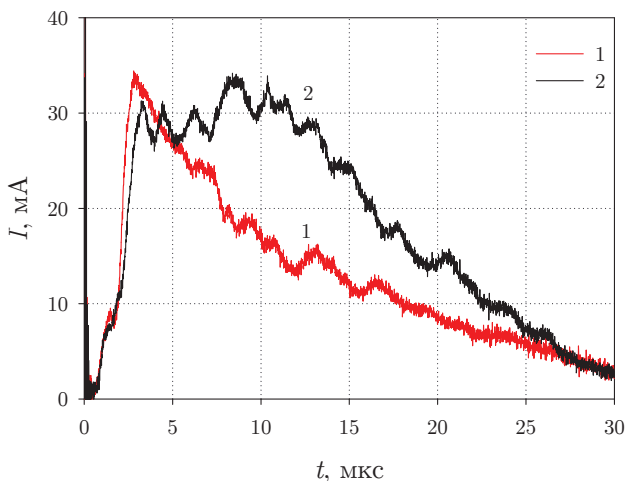


Рис. 4.6. Зависимость тока ионной компоненты пучка частиц из канала объемного пробоя в КВг от времени:

1 — образец толщиной 1 мм; 2 — образец толщиной 2 мм

В обеих экспериментальных ситуациях расстояние между областью разряда и цилиндром Фарадея (времяпролетная база) составляет 18 см. Площадь приемника частиц составляет 16 см^2 .

На рис. 4.7 представлены графики зависимости тока, измеренного цилиндром Фарадея, от времени и от скорости приходящих в цилиндр частиц для случаев разряда по поверхности кристаллов KCl и KBr и объемного пробоя в этих же кристаллах.

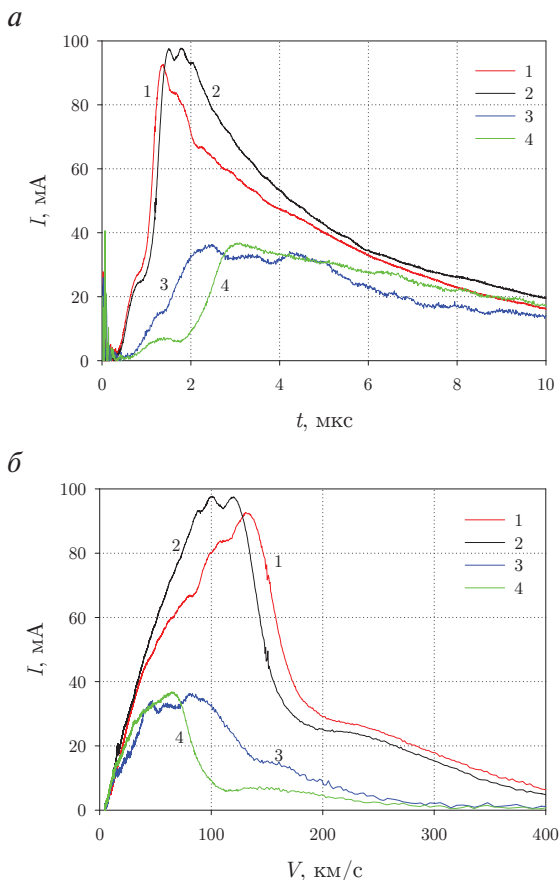


Рис. 4.7. Зависимость тока от времени — *a* и скорости частиц — *б* при выбросе плазмы из:

1 — области разряда по поверхности KBr, $I = 10$ мм; 2 — области разряда по поверхности KCl, $I = 10$ мм; 3 — области канала объемного пробоя в KBr, $d = 1$ мм; 4 — области канала объемного пробоя в KCl, $d = 1$ мм

Исследуя зависимости, можно выделить ряд особенностей. Во-первых, сигнал тока от разряда по поверхности интенсивнее, чем от объемного разряда. Это объясняется большей площадью воздействия разряда. Во-вторых, максимум тока поверхностного разряда приходится на более скоростные ионы, чем объемного. Это, вероятно, связано с меньшим размером зоны ускорения канальной плазмы. Еще одна особенность состоит в том, что максимум тока для KBr соответствует более медленным ионам. Это следствие того, что ионы брома, будучи более тяжелыми, приобретают в ускоряющем поле меньшую скорость по сравнению с ионами хлора. Максимум тока в случае объемного выброса из канала в KCl приходится на ионы со скоростями 50–80 км/с, а в случае поверхностного перекрытия — на ионы, вылетающие со скоростями 100–120 км/с. Для KBr соответствующие максимумы лежат в диапазонах 50–70 км/с и 90–110 км/с.

Анализ соотношения скоростей компонент пучка частиц дает информацию о зарядовом составе плазмы, истекающей из канала пробоя.

На графиках распределения частиц по скоростям, относящихся к поверхностному перекрытию, выделяются два пика. Один из них совпадает с максимумом тока (130 км/с для KCl и 110–120 км/с для KBr), а другой, существенно менее интенсивный, соответствует скорости около 200 км/с для обоих веществ.

На основании рис. 4.8 можно предположить, что этот пик относится к ионам водорода. Видно, что после нескольких сотен разрядов интенсивность пика уменьшается. Основной пик относится к ионам материала диэлектрика. В низкоскоростной части спектра, вероятно, преобладают заряженные кластеры, состоящие из нескольких молекул.

Пик, соответствующий максимуму тока, соответствует высокозарядным ионам калия либо хлора, так как именно они ускоряются наиболее интенсивно. Разделить ионы калия и хлора

не представляется возможным из-за близких значений массы. При наносекундном поверхностном перекрытии по KCl в сходных условиях образуются ионы с зарядовым числом вплоть до $Z = 5$.

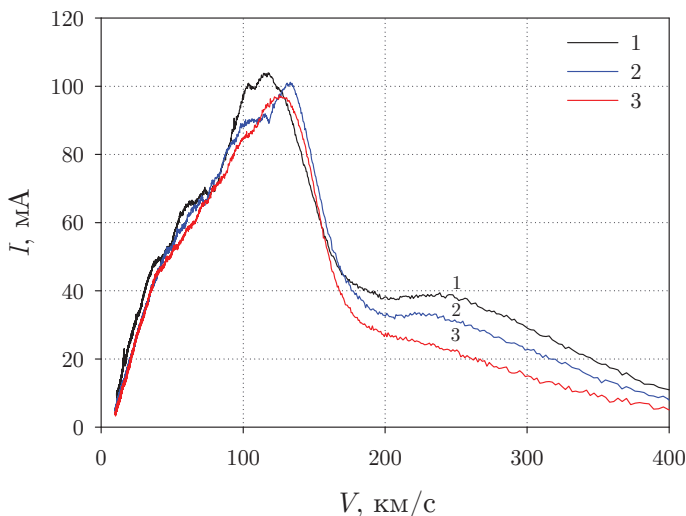


Рис. 4.8. Зависимость тока поверхностного разряда для KCl от скорости части и числа разрядов:

1 — 101–105-й разряды; 2 — 301–305-й разряды; 3 — 501–505-й разряды

Подобие скоростных спектров для процессов объемного и поверхностного пробоя и достаточно высокие значения максимальных скоростей ионов (50–100 км/с) могут говорить об общих механизмах ускорения плазмы. Известны такие механизмы ускорения плазмы, как адиабатическое расширение, амбиполярная диффузия и разлет кулоновского кластера. При адиабатическом расширении ионы ускоряются только до тепловых скоростей (10^3 м/с), поэтому как причина достижения ионами экспериментально наблюдаемых скоростей (10^5 м/с) этот механизм может не рассматриваться. Амбиполярная диф-

фузия также не может обеспечить такие скорости ионов. Наиболее вероятно, что ускорение ионов до энергий 10^3 эВ происходит в результате разлета положительно заряженных кластеров в тонком приповерхностном слое (в случае поверхностного перекрытия) и взрыва положительно заряженного кластера в головной части выходящего в вакуум канала пробоя (в случае пробоя в объеме кристалла).

Заключение

Кратко рассмотрены теории, описывающие механизмы пробоя жидких и твердых диэлектриков, даются краткие характеристики основных параметров, измеряемых в процессе пробоя диэлектриков, описываются перспективы применения высоковольтной техники на основе разрядов. В работе приводятся данные экспериментального и теоретического подхода, который позволяет эффективно характеризовать материалы для современной мощной импульсной техники, в частности:

1. Описан процесс выбора экспериментальной установки для конкретной практической задачи, физические принципы ее работы. Предлагаемая экспериментальная установка позволяет измерять характеристики процесса объемного наносекундного пробоя как жидких, так и твердых диэлектриков, а также композитных материалов (например, пористых диэлектриков, пропитанных жидкостями). Характерные величины воздействия составляют: амплитуда импульсов напряжения — до 140 кВ, длительность импульсов — 8 нс, время нарастания — не более 0,5 нс, начальная напряженность поля $E \sim 10^7$ В/см. Кроме того, имеется возможность измерять энергетические характеристики пучков заряженных частиц, истекающих в вакуум при давлениях до 10^{-2} Па из области поверхностного и объемного разряда.

2. Приведены конкретные примеры измерений скорости развития каналов анодного пробоя для жидких, кристаллических и композитных диэлектриков при напряжении 100 кВ в режи-

ме воздействия отраженными импульсами длительностью 8 нс (до 60 отражений) и скорости нарастания напряжения 10^{14} В/с.

3. Продемонстрирован ряд важных для применения в ИЭРД результатов. Например, показано, что в пористых оксидно-алюминиевых нанокерамиках, пропитанных диэлектрическими жидкостями, собственные пробивные свойства кристаллической матрицы в составе сложного диэлектрика не имеют определяющего значения, если его толщина больше, чем толщина образца, пробиваемого одним импульсом.

4. Приведены фотографии картин электрического разрушения в монокристаллах, отражающие импульсный характер воздействия внешнего электрического поля и позволяющие делать выводы об электрофизических процессах в диэлектрике при больших скоростях изменения напряжения. Формирование канала происходит локально в момент прохождения фронта пробоя.

Результаты исследования будут использованы при проектировании новых моделей импульсных плазмогенераторов и других образцов импульсной техники. Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение диапазона длительностей импульсов. Также представляется интересным фундаментальное исследование наносекундного пробоя ионных кристаллов в области более высоких амплитуд напряжения, где следует ожидать нелинейный характер зависимости скорости распространения каналов пробоя от напряжения.

Контрольные вопросы

1. Какое явление носит название пробоя?
2. Сколько основных типов теорий по пробую жидких диэлектриков существует? На каких принципах они основаны?
3. Какие основные типы теорий по пробую твердых диэлектриков вы знаете?
4. Какие жидкости наиболее часто применяются при исследовании пробоя жидких диэлектриков? В каких областях импульсной техники они используются?
5. Чем объясняется выбор ЩГК для исследования пробоя твердых диэлектриков?
6. Какие основные характеристики будут отличаться при пробое жидких и твердых диэлектриков по поверхности и в объеме?
7. Каковы основные принципы выбора генератора для исследования пробоя?
8. Будет ли отличаться скорость пробоя от направления пробоя в кристалле?
9. Пробоем по какой фазе определяется скорость пробоя в гетерофазных системах?
10. Почему в твердых диэлектриках наблюдается тонкая структура канала? Какие параметры развития пробоя можно из нее определить?

Список сокращений

- ЭРД — электрореактивный двигатель
ИЭРД — импульсный электрореактивный двигатель
ГИН — генератор импульсов напряжения
SOS — semiconductor opening switch, полупроводниковый прерыватель тока
YAG — иттрий-алюминиевый гранат
ЩГК — щелочно-галоидный кристалл
ПММА — полиметилметакрилат
ЖДФ — жидкость диэлектрическая фторсодержащая
ПЭС — полиэтилсилоксан
ПМС — полиметилсилоксан

Библиографический список

1. Физика диэлектриков (область сильных полей) : учеб. пособие / Г. А. Воробьев, Ю. П. Похолков, Ю. Д. Королев, В. И. Меркулов. Томск : Издательство ТПУ, 2003. 244 с.
2. Ушаков В. Я. Импульсный электрический пробой жидкостей / В. Я. Ушаков. Томск : Издательство Томского университета, 1975. 256 с.
3. Воробьев Г. А. Физика диэлектриков, область сильных полей : конспект лекций / Г. А. Воробьев. 2-е изд., исправл. и доп. Томск : Издательство Томского университета, 1977. 252 с.
4. Вершинин Ю. Н. Электронно-тепловые и детонационные процессы в диэлектриках / Ю. Н. Вершинин. Екатеринбург : УрО РАН, 2000. 260 с.
5. Импульсный пробой и разрушение диэлектриков и горных пород / А. А. Воробьев [и др.]. Томск : Издательство Томского университета, 1971. 224 с.
6. Пробой жидкостей при импульсном напряжении / В. Я. Ушаков, В. Ф. Климкин, С. М. Коробейников, В. В. Лопатин. Томск : Издательство научно-технической литературы, 2005. 488 с.
7. Регистрация микропузырьков в трансформаторном масле / Л. А. Дарьян [и др.] // Журнал технической физики. 2008. Т. 34, № 17. С. 88–94.
8. Балыгин И. Е. Электрическая прочность жидких диэлектриков / И. Е. Балыгин. Москва, Ленинград : Издательство «Энергия», 1964. 228 с.

9. Климкин В. Ф. Статистические исследования механизмов электрического пробоя н-гексана в наносекундном диапазоне / В. Ф. Климкин // Журнал технической физики. 2002. Т. 72, № 9. С. 38–43.
10. Вершинин Ю. Н. Электрический пробой твердых диэлектриков. Основы феноменологической теории и ее технические приложения / Ю. Н. Вершинин. Новосибирск : Издательство «Наука», Сибирское отделение, 1968. 212 с.
11. Вершинин Ю. Н. Перегревная неустойчивость в кристаллических изоляторах в предпробивном электрическом поле / Ю. Н. Вершинин, Ю. А. Зотов // Физика твердого тела. 1975. Т. 17, № 3. С. 826–833.
12. Вершинин Ю. Н. Соотношение скоростей электрического разряда и звука в твердом диэлектрике / Ю. Н. Вершинин // Журнал технической физики. 1989. Т. 59, № 2. С. 158–160.
13. Вершинин Ю. Н. Сжимаемость твердых диэлектриков как параметр динамики импульсного пробоя / Ю. Н. Вершинин // Доклады Академии наук. 1996. Т. 347, № 5. С. 614–616.
14. Куликов В. Д. Генерация носителей заряда в кристалле КВг в предпробойных импульсных электрических полях / В. Д. Куликов // Письма в журнал технической физики. 2002. Т. 28, № 3. С. 36–41.
15. Емлин Р. В. Анизотропия электрического пробоя в кристаллическом кварце / Р. В. Емлин, С. В. Барахвостов, В. Д. Куликов // Журнал технической физики. 2009. Т. 79, № 7. С. 150–153.
16. Воробьев Г. А. Физика твердых диэлектриков. Область сверхсильных электрических полей / Г. А. Воробьев, С. Г. Еханин, Н. С. Несмелов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2000. № 8. С. 26–35.
17. Появление дислокаций в сильном электрическом поле / Г. А. Воробьев, С. Г. Еханин, М. М. Милютин, Н. С. Несмелов // Физика твердого тела. 1973. Т. 15, № 8. С. 2545–2547.

18. Воробьев А. А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков / А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев. Москва : Издательство «Высшая школа», 1966. 224 с.
19. Воробьев Г. А. Электрический пробой твердых диэлектриков / Г. А. Воробьев, С. Г. Еханин, Н. С. Несмелов // Физика твердого тела. 2005. Т. 47, № 6. С. 1048–1052.
20. Месяц Г. А. Эктонный механизм пробоя твердых диэлектриков / Г. А. Месяц // Доклады Академии наук. 2004. Т. 399, № 6. С. 757–759.
21. Чернозатонский Л. А. Фононные струи — каналы стримерного пробоя кристаллов / Л. А. Чернозатонский // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1983. Т. 38, № 5. С. 225–228.
22. Зубрицкий В. В. «Фокусировка фононов» и ориентация неполного электрического пробоя в щелочно-галогидных кристаллах / В. В. Зубрицкий // Журнал технической физики. 1991. Т. 61, № 10. С. 82–85.
23. Anderson R. A. Anode-Initiated Surface Flashover / R. A. Anderson // Annual Report. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena: Washington, D. C.: National Academy of Sciences, 1979.
24. Поплавко Ю. М. Физика диэлектриков / Ю. М. Поплавко. Киев : Головное издательство издательского объединения «Вища школа», 1980. 400 с.
25. Уайтхед С. Пробой твердых диэлектриков / С. Уайтхед. Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1957. 270 с.
26. Воробьев Г. А. Свечение электрического разряда в каменной соли / Г. А. Воробьев, И. С. Пикалова // Известия высших учебных заведений. Физика. 1966. № 6. С. 158.
27. Воробьев А. А. О процессах формирования разряда в твердых диэлектриках / А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев, Н. М. Торбин // Физика твердого тела. 1961. Т. 3, № 11. С. 3272–3277.
28. Sakamoto S. Optical Study of Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids / S. Sakamoto, H. Yamada // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1980. Vol. 15, № 3. P. 171–181.

29. Тонконогов М. П. К теории ударных волн, возникающих в твердых телах при импульсных искровых разрядах / М. П. Тонконогов, З. С. Гриншпун, Ю. Д. Ильющенков // Электрическая обработка материалов. 1972. № 6. С. 37–43.
30. Франц В. Пробой диэлектриков / В. Франц. Москва : Издательство иностранной литературы, 1961. 208 с.
31. Верке Дж. В. Прогресс в области диэлектриков : В 2 т. Т. 1 / Дж. Верке, Дж. Г. Шульман. Москва ; Ленинград : Государственное энергетическое издательство, 1962. 308 с.
32. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника / Г. А. Месяц. Москва : Наука, 2004. 704 с.
33. Месяц Г. А. Введение в наносекундную импульсную энергетiku и электронику / Г. А. Месяц, И. В. Пегель. Москва : ФИАН, 2009. 192 с.
34. Курец В. И. Электроимпульсная дезинтеграция материалов / В. И. Курец, А. Ф. Усов, В. А. Цукерман. Апатиты : Издательство Кольского научного центра РАН, 2002. 324 с.
35. Электрофизика на Урале: четверть века исследований / под ред. В. Г. Шпак. Екатеринбург : Издательство УрО РАН, 2011. 456 с.
36. Воробьев А. А. Изоляционные свойства, прочность и разрушение диэлектриков / А. А. Воробьев. Новосибирск : Издательство Сибирского отделения АН СССР, 1960. 204 с.
37. Воробьев Г. А. Эффект внедрения разряда в твердый диэлектрик, погруженный в изолирующую жидкость / Г. А. Воробьев // Журнал технической физики. 2005. Т. 75, № 4. С. 125–127.

Учебное издание

**Пунанов Иван Федорович,
Жидков Иван Сергеевич,
Чолах Сеиф Османович**

**ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ
НАНОСЕКУНДНЫЙ ПРОБОЙ
КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД**

Редактор Н. П. Кубыщенко
Верстка О. П. Игнатьевой

Подписано в печать 20.11.2018. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Цифровая печать. Усл. печ. л. 6,7.
Уч.-изд. л. 5,4. Тираж 40 экз. Заказ 284

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: +7 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: +7 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13
Факс: +7 (343) 358-93-06
<http://print.urfu.ru>

